

**Stefan Brumm**

**Leistungssteigerung beim Lichtbogenschweißen durch Verwendung von  
Drahtelektroden größeren Durchmessers**

**Fertigungstechnik –  
aus den Grundlagen für die Anwendung**  
Schriften aus der Ilmenauer Fertigungstechnik

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann  
(Technische Universität Ilmenau).

**Band 6**

# **Leistungssteigerung beim Lichtbogenschweißen durch Verwendung von Drahtelektroden größeren Durchmessers**

Stefan Brumm



Universitätsverlag Ilmenau

2018

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau  
als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 20. Juni 2017

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann  
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gunnar Bürkner  
(Steinbeis-Innovationszentrum Chemnitz)
3. Gutachter: Dr.-Ing. Erwan Siewert  
(Linde AG München)

Tag der Verteidigung: 02. Februar 2018

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net/>

**ISSN** 2199-8159 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-191-1 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018000361

---



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik und am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse der Technischen Universität Chemnitz.

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die mich auf dem Weg begleiteten und zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beitrugen. Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Bürkner sowohl für die zahlreichen fachlichen Diskussionen als auch die Unterstützung.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. J. P. Bergmann.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. habil. F. Riedel und Herrn Dr.-Ing. L. Ebert für die Durchsicht der Arbeit bedanken.

Zudem Danke ich meinen Kollegen, insbesondere Herrn Dr.-Ing. A. Hälsig für die vielen konstruktiven Diskussionen der Ergebnisse und Herrn Dipl.-Ing. R. Agsten für die Unterstützung bei den praktischen Versuchen. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Hilfswissenschaftlern und Studenten bedanken, die durch Beleg- und Abschlussarbeiten zum Gelingen der Dissertation einen Anteil leisteten. Besonders ist hier Herr M. Sc. J. Kimme zu nennen.

Bei den Herren Dr.-Ing. W. Schneider und Dr.-Ing. S. Thurner bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die hervorragende Einarbeitung in die Schweißtechnik.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für das entgegengebrachte Vertrauen und den Beistand bedanken.

*Stefan Brumm*

## Kurzfassung

Ein wirtschaftlicher Einsatz des Metall-Schutzgas-Schweißens (MSG) bei langen Schweißnähten mit großen Nahtquerschnitten ist nur mit hohen Abschmelzleistungen realisierbar. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Ausbringung ist die Erhöhung des Durchmessers der Drahtelektrode. Bisher fehlen jedoch grundlegende Erkenntnisse zum Prozessverhalten (Lichtbogens Ausbildung, Tropfenübergang, Einbrandgeometrie), zu den Einsatzmöglichkeiten (Fügestellengeometrie, Blechdicke) und zur erreichbaren Nahtqualität (mechanische Eigenschaften, Oberflächenausssehen).

In der vorliegenden Arbeit wurde erforscht, wie sich die Vergrößerung des Drahtelektroden durchmessers auf den MSG-Prozess in seiner Gesamtheit auswirkt. Für die experimentellen Versuche wurde eine vollelektronische, sekundär getaktete Hochleistungsstromquelle ( $I = 1500 \text{ A}$  bei 100 % Einschalt-dauer) verwendet. Es kamen Massivdrahtelektroden (G3Si1) mit unterschiedlichen Durchmessern ( $d_d = 3,2$  und  $4,0 \text{ mm}$ ) zum Einsatz. Zur Prozess- und Lichtbogenanalyse wurden die elektrischen Größen messtechnisch erfasst. Synchronisierte Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dienten zur Betrachtung und Beurteilung von Tropfenentstehung, -ablösung und Lichtbogens Ausbildung sowie Schmelzbaddynamik. In den Grundlagenuntersuchungen stand die Wechselwirkung zwischen elektrischen Parametern, Lichtbogen und Schweißnaht im Mittelpunkt. Die Verbindungseigenschaften wurden an geschweißten Blechen (S355J2+N) mit Dicken von 12, 15 und 20 mm ermittelt.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass bei Einhaltung aller prozessbedingten Besonderheiten und unter Beachtung der verfahrensspezifischen Randbedingungen mit dem MSG-Dickdraht-Verfahren anforderungsgerechte Schweißnähte hergestellt werden können.

Mit der Erweiterung der MSG-Verfahrensvarianten um das MSG-Dickdraht-Schweißen ist eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Abschmelzleistung möglich. Damit ergeben sich wesentliche Vorteile für den Anwender im Dickblechbereich ( $s > 8 \text{ mm}$ ).

## Abstract

Due to economic aspects in the production of welded steel constructions quantitative requirements must be met without disregarding quality. The welding process not only creates the microstructure of the seam and the heat affected zone along with the mechanical and technological properties but is also responsible for the efficiency. Nowadays electrodes with a diameter up to 1.6 mm are used for gas shielded metal arc welding.

In the present work the overall effect on the GMAW process by increasing the electrode diameter was investigated. For the experimental investigations an all-electronic, secondary clocked, high power welding source and as filler material selected electrodes (G3Si1) with a diameter of 3.2 mm and 4.0 mm were used. Electrical values were measured in order to analyse the process and the arc. Synchronous high speed photographs were used for monitoring and evaluation of drop formation, - separation and arc formation as well as weld pool movement. Weld properties were determined from welded sheets (S355J2+N) with a thickness of 12, 15 and 20 mm. The study of interaction between electrical parameters, arc und welded joint were necessary to understand basic issues. As result it can be stated that GMAW with thick wire delivers joints that meet specific requirements if all process conditions are observed. The Expansion of the GMAW technique to thick wire welding leads to a significant increase of the efficiency in relation to the possible deposition rate. As a consequence, this provides considerable advantages for users welding sheets with a thickness of above 8 mm. To utilise the new technique it is necessary to test it under real conditions in order to transfer the laboratory findings to industrial production.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1	Lichtbogenschweißen.....	5
2.1.1	Einordnung und Gliederung der Verfahrensgruppe.....	5
2.1.2	Verfahrensbeschreibung, Wirkweise und Anlagentechnik.....	6
2.1.2.1	Metall-Schutzgas-Schweißen.....	6
2.1.2.2	Unterpulverschweißen.....	7
2.1.3	Ausgewählte Verfahrensvarianten und Technologien .....	13
2.2	Lichtbogen, Kräfte und Werkstoffübergang .....	29
<b>3</b>	<b>Zielstellung der Arbeit.....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>Modellbetrachtung zum Lichtbogen-Schweißen .....</b>	<b>41</b>
4.1	Ausgangssituation .....	41
4.2	Physik und Wirkung des Lichtbogens auf Elektrode sowie Schmelzbad .....	41
4.3	Schlussfolgerungen .....	46
<b>5</b>	<b>MSG-Dickdraht-Schweißen – technisches Equipment und Prozessgestaltung .....</b>	<b>50</b>
5.1	Versuchswerkstoffe .....	50
5.2	Versuchsaufbau und Auswerteverfahren .....	50
5.3	Lichtbogens Ausbildung und Werkstoffübergang.....	53
5.3.1	Versuchsparameter .....	53
5.3.2	Schweißleistung .....	55
5.3.3	Schutzgas .....	75
5.3.4	Brennerabstand .....	79
5.3.5	Charakteristik der Schweißmaschine.....	83
5.4	Schweißnahtgeometrie .....	85
5.4.1	Versuchsparameter .....	85
5.4.2	Schutzgas .....	86
5.4.3	Schweißleistung .....	87
5.4.4	Schweißgeschwindigkeit.....	89
5.4.5	Brennerstellung .....	90
5.4.6	Drahtelektrodendurchmesser.....	92
5.5	Schweißverbindungen .....	93
5.5.1	Versuchsparameter .....	93
5.5.2	Schweißnahtvorbereitung .....	94

---

5.5.3	Nahtöffnungswinkel $\alpha$ .....	98
5.5.4	Fugentiefe $c$ .....	100
<b>6</b>	<b>MSG-Dickdraht-Schweißen – Beurteilung und Bewertung der Schweißergebnisse.....</b>	<b>102</b>
6.1	Allgemeines.....	102
6.2	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen.....	103
6.2.1	Sichtprüfung.....	103
6.2.2	Farbeindringprüfung.....	105
6.2.3	Durchstrahlungsprüfung.....	105
6.3	Zerstörende Werkstoffprüfungen .....	107
6.3.1	Chemische Analyse des Schweißgutes.....	107
6.3.2	Zugprüfung.....	108
6.3.3	Kerbschlagbiegeprüfung.....	111
6.3.4	Härte nach Vickers .....	113
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>131</b>

## Abkürzungsverzeichnis

A	-	Lichtbogenansatzpunkt
A <sub>n</sub>	-	Arbeitspunkt n
Al	-	Aluminium
AlMg5	-	Aluminiumlegierung mit 5 % Magnesium
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Aluminiumoxid
Ar	-	Argon
As	-	Arsen
B <sub>1</sub>	-	Klemmbolzen
B <sub>2</sub>	-	Abschirmbolzen
BG	-	Bewertungsgruppe
C	-	Kohlenstoff
CaF <sub>2</sub>	-	Calciumdifluorid
CC	-	Konstantstrom
CO	-	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	-	Kohlenstoffdioxid
Co	-	Kobalt
Cr	-	Chrom
Cu	-	Kupfer
CV	-	Konstantspannung
C1	-	Schutzgas aus 100 % CO <sub>2</sub>
DVS	-	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
ED	-	Einschaltdauer
FD	-	freies Drahtende
FeO	-	Eisenoxid
GL	-	Gegenlage
GMAW	-	gas metal arc welding (Metallschutzgas-Schweißen)
GW	-	Grundwerkstoff
G3Si1	-	Legierungstyp der Massivdrahtelektrode
He	-	Helium
I1	-	reines Argon
KA	-	Kontaktabstand
KL	-	Kerblage
L	-	Lage
L <sub>n</sub>	-	Leiter n

---

LB	-	Lichtbogen
LLB	-	Langlichtbogen
M	-	Messstelle
MAG	-	Metall-Aktivgas-Schweißen
MAGhk	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Hochleistungskurzlichtbogen-Schweißen
MAGhs	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Hochleistungssprühlichtbogen-Schweißen
MAGs	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Sprühlichtbogen-Schweißen
MAGp	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Impulslichtbogen-Schweißen
MAGr	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Rotationslichtbogen-Schweißen
MAGC	-	Metall-Aktivgas-Schweißen mit CO <sub>2</sub>
MAGD	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Parallel-Lichtbogen-Schweißen
MAGDp	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Parallel-Impulslichtbogen-Schweißen
MAGDs	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Parallel-Sprühlichtbogen-Schweißen
MAGM	-	Metall-Aktivgas-Schweißen mit Mischgasen
MAGT	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Tandem-Schweißen
MAGTk	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Tandem-Kurzlichtbogen-Schweißen
MAGTp	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Tandem-Impulslichtbogen-Schweißen
MAGTs	-	Metall-Aktivgas-Schweißen, Tandem-Sprühlichtbogen-Schweißen
MIG	-	Metall-Inertgas-Schweißen
MIGp	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Impulslichtbogen-Schweißen
MIGr	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Rotationslichtbogen-Schweißen
MIGs	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Sprühlichtbogen-Schweißen
MIGD	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Parallel-Lichtbogen-Schweißen
MIGDp	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Parallel-Impulslichtbogen-Schweißen



---

MIGDs	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Parallel-Sprühlichtbogen-Schweißen
MAGp	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Impulslichtbogen-Schweißen
MAGr	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Rotationslichtbogen-Schweißen
MIGT	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Tandem-Schweißen
MIGTk	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Tandem-Kurzlichtbogen-Schweißen
MIGTp	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Tandem-Impulslichtbogen-Schweißen
MIGTs	-	Metall-Inertgas-Schweißen, Tandem-Sprühlichtbogen-Schweißen
Mn	-	Mangan
MnO	-	Manganoxid
Mo	-	Molybdän
MSG	-	Metall-Schutzgas-Schweißen
M21	-	Schutzgasgemisch aus 5 - 25 % CO <sub>2</sub> und Ar
N	-	Nullpunkt der Fugenöffnung
Ni	-	Nickel
oG	-	ohne Begrenzung der Amplitude des Schweißstromes
O	-	Sauerstoff
P	-	Phosphor
S	-	Schwefel
SAW	-	submerged arc welding (Unterpulverschweißen)
SG	-	Schweißgut
Si	-	Silizium
SiO <sub>2</sub>	-	Siliziumdioxid
SL	-	Schmelzlinie
SLB	-	Sprühlichtbogen
Stabw	-	Standardabweichung
Ti	-	Titan
TiO <sub>2</sub>	-	Titandioxid
ÜLB	-	Übergangslichtbogen
UP	-	Unterpulver
V	-	Vanadium
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
X	-	Punkt X
Y	-	Punkt Y

## Formel- und Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Benennung
$A_{\text{Draht}}$	$\text{mm}^2$	Querschnitt der Drahtelektrode
$A_{\text{Leiter}}$	$\text{mm}^2$	Querschnitt eines Stromleiters
$a$	mm	Stegabstand
$a$ -Maß	mm	Nahthöhe in einer Kehlnaht
$\vec{B}$	T	magnetische Flussdichte
$b$	mm	Steghöhe
$C_n$		Konstante
$c$	mm	Fugentiefe
$c_d$	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	spezifische Wärmekapazität der Drahtelektrode
$d_a$	mm	Außendurchmesser
$d_d$	mm	Drahtdurchmesser
$d_i$	mm	Innendurchmesser
$E$	$\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$	Streckenenergie
$\vec{E}$	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrische Feldstärke
$e$	mm	seitlicher Brennerabstand beim Kehlnahtschweißen
$\vec{F}$	N	Kraft
$f_{\text{Abtast}}$	kHz	Abtastfrequenz der Messwertaufnahme
$\vec{H}$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	magnetische Feldstärke
$H_{\text{fus}}$	$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	Schmelzenthalpie
$h$	mm	Größe der Nahtüberhöhung
$h_{\text{zul}}$	mm	zulässige Größe der Nahtunregelmäßigkeit
$I$	A	Stromstärke
$I_{\text{Einstell}}$	A	eingestellte Stromstärke
$I_{\text{Einstell\_max}}$	A	maximale eingestellte Stromstärke
$I_{\text{Einstell\_min}}$	A	minimale eingestellte Stromstärke
$I_{\text{Einstell\_ref}}$	A	Bezugswert der eingestellten Stromstärke

$\Delta I_{\text{Einstell}}$	A	Inkrement der eingestellten Stromstärke
$I_{\text{max}}$	A	maximale Stromstärke
$I_{\text{max1}}$	A	maximale Strombelastbarkeit der Drahtelektrode
$I_{\text{mess}}$	A	gemessene Stromstärke
$I_{\text{min}}$	A	minimale Stromstärke
$I_1$	A	Beispielstromstärke ( $I_1 < I_2$ )
$I_2$	A	Beispielstromstärke ( $I_2 > I_1$ )
$I_s$	A	Schweißstromstärke
$i_n$	A	Stromstärke am Arbeitspunkt n
$J$	A·mm <sup>-2</sup>	Stromdichte
$KA$	mm	Kontaktrohrabstand
$KA_{\text{max}}$	mm	maximaler Kontaktrohrabstand
$KA_{\text{min}}$	mm	minimaler Kontaktrohrabstand
$KA_{\text{ref}}$	mm	Bezugswert des Kontaktrohrabstands
$l$	mm	Länge der Nahtunregelmäßigkeit
$l_f$	mm	Abstand zwischen Kontaktierung des Drahtes bis zum Lichtbogenansatz
$l_o$	mm	Länge des freien Drahtendes
$l_{\text{LB}}$	mm	Länge des Lichtbogens
$l_{\text{Leiter}}$	mm	Länge eines Stromleiters
$MR$	kg·h <sup>-1</sup>	Abschmelzleistung
$m_d$	kg	Masse der Drahtelektrode
$P$	W	Schweißleistung
$p$	mm	Einbrandtiefe
$\underline{Q}$	C	im Raum bewegte Ladung
$R$	Ω	elektrischer Widerstand zwischen Kontaktrohr und Werkstück
$R_{\text{LB}}$	Ω	elektrischer Widerstand der Lichtbogenstrecke
$s$	mm	Blechdicke
$\vec{s}$	m	Weg
$T_{\text{Schlacke}}$	°C	Schlackentemperatur
$T_{\text{Schmelz}}$	°C	Schmelztemperatur
$\Delta T$	K	Temperaturdifferenz
$t$	s	Zeit

$U$	V	Spannung
$U_1$	V	Spannung 1 ( $U_1 < U_2$ )
$U_2$	V	Spannung 2 ( $U_2 < U_3$ )
$U_3$	V	Spannung 3 ( $U_3 > U_2$ )
$U_A$	V	Spannungsabfall im Anodenfallgebiet
$U_{lf}$	V	Spannungsabfall zwischen Kontaktierung des Drahtes bis zum Lichtbogenansatz
$U_{\text{Einstell}}$	V	eingestellte Spannung
$U_{\text{ges}}$	V	Gesamtspannungsabfall zwischen Schweißmaschine und Messbereich
$U_K$	V	Spannungsabfall im Kathodenfallgebiet
$U_{\text{Kabel 1}}$	V	Spannungsabfall im Zuleitungskabel 1
$U_{\text{Kabel 2}}$	V	Spannungsabfall im Zuleitungskabel 2
$U_{\text{max}}$	V	maximale Spannung
$U_{\text{mess}}$	V	gemessene Spannung
$U_{\text{min}}$	V	minimale Spannung
$U_{\text{Rohr}}$	V	Spannungsabfall im rohrförmigen Probenkörper
$U_s$	V	Lichtbogenspannung
$U_S$	V	Spannungsabfall in der Lichtbogensäule
$U_{\text{SB}}$	V	Spannungsabfall im Schmelzbad
$U_{\text{XY}}$	V	Spannungsabfall zwischen den Punkten X und Y
$\Delta U_{\text{Einstell}}$	V	Inkrement eingestellte Spannung
$U_n$	V	Spannung am Arbeitspunkt n
$u_k$	cal·g <sup>-1</sup>	innere Energie; für die Temperatur, bei der sich der Metalltropfen an der Elektrode bildet
$u_w$	cal·g <sup>-1</sup>	innere Energie; für die Temperatur, die auf die Widerstandserwärmung zurückzuführen ist
$v_d$	m·min <sup>-1</sup>	Drahtvorschubgeschwindigkeit
$v_s$	cm·min <sup>-1</sup>	Schweißgeschwindigkeit

$v_{\text{s max}}$	$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	maximale Schweißgeschwindigkeit
$v_{\text{s min}}$	$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	minimale Schweißgeschwindigkeit
$v_{\text{s ref}}$	$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	Bezugswert der Schweißgeschwindigkeit
$W_{\text{xy}}$	J	verrichtete Arbeit einer bewegten Punktladung zwischen den Punkten X und Y
$w$	mm	Schweißnahtbreite
$x$	mm	Abstand des Lichtbogenansatzes zur Nahtflanke
$a$	°	Nahtöffnungswinkel
$\beta_{\text{max}}$	°	maximaler Brenneranstellwinkel in Schweißrichtung
$\beta_{\text{min}}$	°	minimaler Brenneranstellwinkel in Schweißrichtung
$\beta_{\text{ref}}$	°	Bezugswert des Brenneranstellwinkels in Schweißrichtung
$\gamma$	°	Brenneranstellwinkel zur Senkrechten
$\varepsilon$	°	beim Kehlnahtschweißen Übergangswinkel zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff
$\varrho_{\text{d}}$	$\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$	spezifischer elektrischer Widerstand des Elektrodenendes
$\varrho_{\text{d}}$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Dichte des Elektrodenwerkstoffs
$\eta_{\text{th}}$		thermischer Wirkungsgrad
$\eta_{\text{MR}}$		Wirkungsgrad des Lichtbogens bezogen auf die abgeschmolzene Elektrodenmasse
$\mu$	$10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$	Viskosität
$\mu_1$	H·m	magnetische Permeabilität



# 1 Einleitung

Das Lichtbogenschweißen ist die dominierende Füge­technologie im Dickblechbereich. Dabei stellt das Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) eines der bedeutendsten Fügeverfahren weltweit dar. Das Diagramm der Abbildung 1-1 zeigt die Anteile der Produktionswerte für Geräte der Schweiß-, Löt- und Trenntechnik in Deutschland für das Jahr 2011. Der Gesamtproduktionswert im Bereich Geräte lag bei 2,2 Mrd. €. Davon sind 12 % (266 Mio. €) elektrische Maschinen zum Lichtbogenschweißen [MOO13].

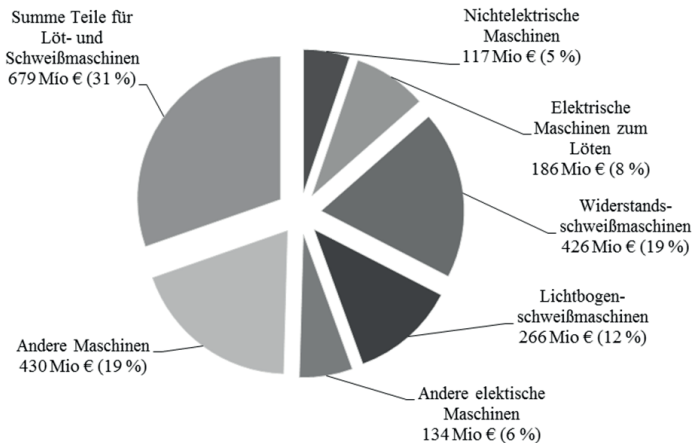


Abbildung 1-1: Ausgewählte Produktionsergebnisse zu Geräten zum Schweißen, Löten und thermischen Trennen in Deutschland, Stand 2011 [MOO13]

Bei den Zusatzwerkstoffen für das Schweißen und Löten ergab sich für das Jahr 2011 ein Produktionswert von etwa 561 Mio. €. Das Diagramm der Abbildung 1-2 zeigt die einzelnen Anteile. Es ist zu sehen, dass 47 % (364 Mio. €) die Massiv- und Fülldrähte sowie -bänder einnehmen. Aus den Zahlen wird deutlich, welches wirtschaftliche Gewicht die Lichtbogenschweißverfahren haben.

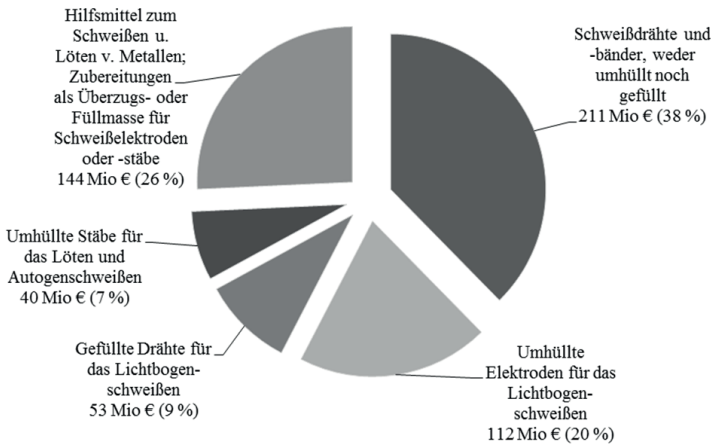


Abbildung 1-2: Ausgewählte Produktionsergebnisse zu Zusatzwerkstoffen zum Schweißen und Löten in Deutschland, Stand 2011 [MOO13]

Anwendungen betreffen den Chemieanlagenbau für Kessel und Behälter, den Stahl- sowie Schiffsbau und die Rohrfertigung bis hin zur Herstellung von Sondermaschinen im Bauwesen als auch im militärischen Bereich. In Abbildung 1-3 sind einige ausgewählte Beispiele dargestellt. Typisch sind lange Schweißnähte mit großen Nahtquerschnitten. Dazu werden Mehrlagen- und Lage-/Gegenlageschweißungen durchgeführt, die eine hohe Abschmelzleistung von Zusatzwerkstoffen erfordern. Bevorzugtes Lichtbogenverfahren ist das Unterpulver (UP) -Schweißen. Die Vorteile des Verfahrens liegen vor allem in seiner ausgezeichneten Prozesssicherheit sowie in der hohen Wirtschaftlichkeit. Trotz der Vorteile ergeben sich auch Nachteile beim UP-Schweißen. Es ist die fehlende Beobachtungsmöglichkeit des Schweißvorgangs durch den Schweißer bzw. Anlagenbediener. Vor allem stellt das Pulver- und Schlackenhandling eine Herausforderung hinsichtlich der Zu-/Abführung sowie der Rücktrocknung dar. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll UP-typische Schweißaufgaben durch das flexible und in der Handhabung im Vergleich unkomplizierte Metall-Schutzgas (MSG) -Verfahren zu substituieren. Die herkömmliche MSG-Technologie besitzt jedoch eine zu geringe Abschmelzleistung (bis etwa  $7,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ), um konkurrenzfähig zum UP-Verfahren zu sein. Deshalb wurden Alternativen wie das MSG-Tandem-, MSG-Doppeldrahtschweißen sowie der T.I.M.E.-Prozess entwickelt. Bei diesen Verfahren wird die Abschmelzleistung durch die Zuführung einer zweiten Drahtelektrode in die Prozesszone bzw. durch Verwendung von Vierkomponentengas erhöht. Andere MSG-





Abbildung 1-3: a) Leipziger Zentralstadion [NN16.1]; b) Viadukt von Millau [NN16.2]; c) Bau einer Pipeline [NN16.3]; d) Liebherr Mobilkran LTM 11200-9.1 [NN16.4]; e) Bau der „Celebrity Solstice“ in der Meyer Werft [NN16.5]; f) Fertigung von FLIRT-Triebzügen bei Stadler [NN16.6]; g) Druckbehälterfertigung [NN16.7]; h) Spannbandbrücke in Oberhausen [NN16.8]; i) Offshore-Windanlagen im Aufbau [NN16.9]

Hochleistungsvarianten wie das Flachdrahtschweißen oder Hybridtechnologien haben sich bisher im Stahlbau aufgrund des erhöhten technischen Aufwandes, Vorbehalten gegenüber der Prozesssicherheit und der Schweißnahtqualität nicht in dem Maße durchgesetzt wie es der Wirtschaftlichkeit entspräche.

Die prozesstechnisch einfachste Möglichkeit, die Abschmelzleistung des MSG-Verfahrens zu steigern, besteht in der Erhöhung des Drahtelektrodendurchmessers. Bisher wird diese Variante industriell in Sonderfällen für Schweißverbindungen von Aluminiumwerkstoffen verwendet [WIM03]. Im Stahlsektor kommt die Technologie zum Heftschweißen in der Großrohrfertigung zum Einsatz. Die erzeugten Heftnähte dienen zur Stabilisierung der Rohrform und als Badstütze für die nachfolgende UP-Naht. [AIC75] berichtet von einer An-

wendung des MSG-Schweißens mit einer 2,4 mm Elektrode im Lastkraftwagenbau. Bei der zum Schweißen eingesetzten Anlagentechnik handelt es sich um Sonderlösungen, die auf spezielle Anwendungen zugeschnitten sind. Dazu zählen vor allem leistungsfähige Stromquellen und hoch belastbare Schweißbrenner.

Aktuell sind elektronisch geregelte Schweißstromquellen verfügbar, die 1500 A Schweißstromstärke bereitstellen. Damit sind modifizierte Lichtbögen und ein Schweißen von Drahtelektroden größeren Durchmessers realisierbar. In wie weit sich die bekannten Lichtbogenarten vom MSG-Schweißen mit Drahtelektrorendurchmessern bis 2,4 mm auf „dickere“ Drähte übertragen lassen, ist bisher nur mit Gleichrichter-Schweißmaschinen untersucht worden. Diese Ergebnisse können aber nur zum Teil auf das MSG-Schweißen mit prozessregenden Schweißmaschinen angewendet werden.

Die Suche nach technischen Lösungen zur Erzeugung sowie Stabilisierung des Lichtbogens zum partiellen Auf-/Abschmelzen von Metallen ist Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um die Verwendbarkeit der Verfahren zu verbessern und den Anforderungen an die Verbindungsqualität moderner Werkstoffe zu entsprechen. Die Entwicklung im Bereich der Rechentechnik ist ein ausschlaggebender Faktor dafür, dass moderne Schweißmaschinen Lichtbogenregelungen besitzen, die in ihrer Dynamik und Leistungsfähigkeit ein Schweißen mit Drähten größeren Durchmessers erlauben. Die Annahme, den Drahtdurchmesser beim MSG-Schweißen beliebig zu erhöhen, basiert auf der These, dass nur eine Abhängigkeit von bereitgestellter Schweißleistung und Drahtelektrorendurchmesser besteht. Eine allgemeine technische Anwendbarkeit dieser These wird jedoch durch Restriktionen begrenzt. Diese sind die physikalischen Zusammenhänge zwischen Leistung zum Erzeugen des Plasmas sowie der Leistung zum Schmelzen des Zusatzwerkstoffes. Des Weiteren ist ein nicht zu vernachlässigender Faktor das Abschmelzverhalten des Zusatzwerkstoffes, welches Einfluss auf die Lichtbogensäule ausübt. Weiterhin grenzen die komplexen Wechselwirkungen zwischen Lichtbogen und Schmelzbad die beliebige Erhöhung des Drahtelektrorendurchmessers ein.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist das MSG-Schweißen mit Drahtelektroden größeren Durchmessers und das Aufzeigen von Einschränkungen sowie das Herausstellen von maßgeblich den Prozess beeinflussenden Wirkgrößen und -mechanismen, ohne dabei die Nahtqualität zu vernachlässigen.

Ausgehend von der Tatsache, dass heute im Dickblechbereich vorrangig das UP-Schweißen eingesetzt wird, wird dieses Verfahren in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet, um die Vor- und Nachteile des MSG-Dickdraht-Schweißens offen zu legen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Lichtbogenschweißen

#### 2.1.1 Einordnung und Gliederung der Verfahrensgruppe

Nach DIN 8593-0 zählt das Lichtbogenschweißen als Fertigungsverfahren zur Hauptgruppe 4 Fügen und wird entsprechend der Technologie in die Gruppe 4.6 Fügen durch Schweißen (DIN 8593-6) eingegliedert. Das Lichtbogenschweißen nutzt als Energieträger die elektrische Gasentladung als Wärmequelle und wird deshalb in der Untergruppe 4.6.2 Schmelzschweißen und weiter in 4.6.2.4 Schmelzschweißen durch elektrische Gasentladung einsortiert. In DIN 1910-100 werden die Prozesse anhand des Energieträgers eingeteilt. Demnach zählen sowohl das UP- als auch das MSG-Schweißen zu den Lichtbogenschweißverfahren. Abbildung 2.1.1-1 zeigt eine entsprechende Übersicht. Beim UP-Schweißen wird nochmals unterteilt nach der Art und Anzahl der verwendeten Elektroden. Eine weitere Unterteilung beim MSG-Schweißen erfolgt in die verwendeten Schutzgase.

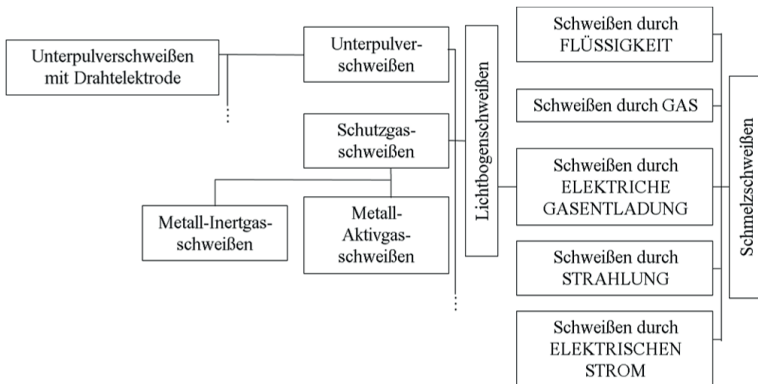


Abbildung 2.1.1-1: Einordnung des Schutzgas- und Unterpulverschweißens in die Gruppe der Schmelzschweißverfahren

## 2.1.2 Verfahrensbeschreibung, Wirkweise und Anlagentechnik

### 2.1.2.1 Metall-Schutzgas-Schweißen

Eines der verbreitetsten Lichtbogenschweißverfahren mit kontinuierlicher Drahtförderung ist das Metall-Schutzgas (MSG) -Schweißen. In Bezug auf die Menge des abgesetzten Schweißgutes ist es das am häufigsten eingesetzte Schmelzschweißverfahren [EWM09]. Bei diesem Verfahren brennt ein Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Elektrode und einem Werkstück. Die abschmelzende Drahtelektrode ist gleichzeitig der Zusatzwerkstoff. Unter Schutzgas schmilzt die kontinuierliche zugeführte Elektrode ab. Eine Schutzgasabdeckung ist erforderlich, um den schmelzflüssigen Zusatzwerkstoff (Tropfen) und das Schweißbad vor den schädlichen Einflüssen (Oxidation, Porenbildung) der Atmosphäre zu schützen. Die Zuführung des Schutzgases erfolgt dabei permanent. Dazu werden verschiedene Gase beim MSG-Schweißen eingesetzt. Werden chemisch inaktive Gase, wie Argon (Ar), Helium (He) oder deren Gemische verwendet, wird das Verfahren als Metall-Inert-Gas (MIG) -Schweißen bezeichnet. Die reaktionsträgen inerten Gase reagieren nicht mit den zu verschweißenden Werkstoffen. Bei aktiven Gasen wie Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) wird das Verfahren als Metallaktivgas (MAG) -Schweißen bezeichnet. Aktive Gase begünstigen allerdings die Oxidation der Schweißstelle, was nicht nur negative, sondern auch positive Auswirkung auf das Schweißergebnis haben kann [DIL06]. Das Verfahrensprinzip des MSG-Schweißen ist in Abbildung 2.1.2-1 dargestellt. Die Zuführung des Drahtes erfolgt mechanisch über ein Drahtvorschubsystem. Um den Drall des Drahtes zu

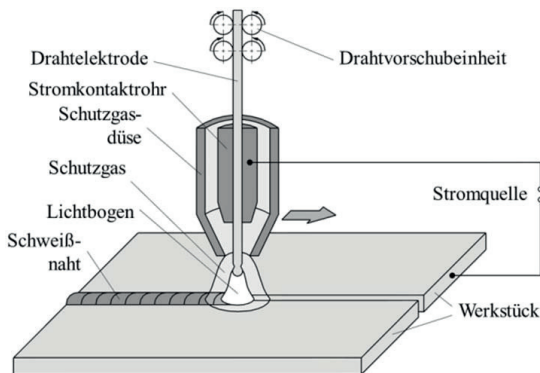


Abbildung 2.1.2-1: Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens [MAT12]

beseitigen, wird dieser durch ein Richtwerk und anschließend durch das Schlauchpaket zur Schweißstelle gefördert. Im Schweißbrenner erfolgt der Stromübergang in der Kontaktdüse. Über eine konzentrische Düse wird das Schutzgas der Schweißstelle zugeführt. Um die thermische Belastung der Schweißbrenner - Erwärmung der Gas- und Stromkontaktdüse bis nahe der Schmelztemperatur von Cu - bei hohen Schweißleistungen zu reduzieren, werden Schläuche zur Förderung von Medien wie Kühlwasser im Schlauchpaket untergebracht [DIL94].

Die zum MSG-Schweißen benötigte Anlagentechnik besteht aus einer Schweißstromquelle, einem Drahtvorschubgerät und einem Schweißbrenner. Die konventionelle Schweißmaschine ist eine stufengeschaltete Stromquelle mit Transformator (siehe Abbildung 2.1.2-2). Diese Maschinen arbeiten mit statisch flach fallender Kennlinie (vgl. Abbildung 2.1.2-3). Die sich je nach eingestellter Schweißstromstärke und -spannung einstellenden Lichtbogenarten werden in Kapitel 2.1.3 erläutert.

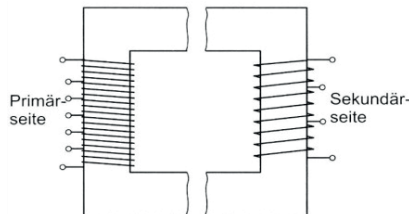


Abbildung 2.1.2-2: Aufbau eines Transformators mit primär-/sekundärseitigem Stufenschalter [MAT02]

Diese Art Maschinen werden immer mehr durch elektronische und Software geregelte Schweißmaschinen verdrängt [JÄS14]. Aufgrund der primärseitigen Taktung der Wechselstromfrequenz kann der nachgeschaltete Transformator wesentlich kleiner ausgeführt sein, was dazu führt, dass die Maschinen einen deutlich geringeren Bauraum in Anspruch nehmen und einen höheren elektrischen Wirkungsgrad gegenüber sekundär getakteten aufweisen. In Abbildung 2.1.2-4 ist der Aufbau eines primär getakteten Schweißumrichters dargestellt.

### 2.1.2.2 Unterpulverschweißen

Das UP-Schweißen wurde in Amerika 1933 als „Unionmelt“ [MÜL83] eingeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass es sich um ein Widerstandsschweißverfahren handelt, bei dem kein Lichtbogen brennt [BEC03]. Der in Deutschland unter dem Namen Ellira-Verfahren (Elektro Linde Rapid)

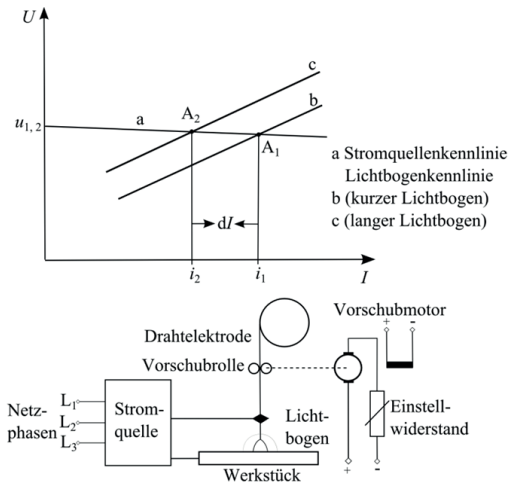
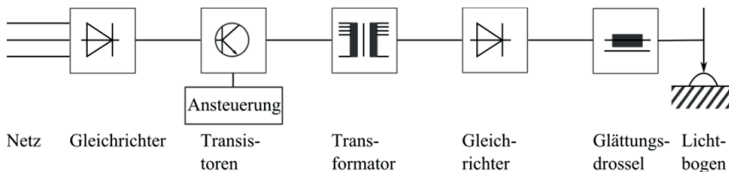
Abbildung 2.1.2-3: Schaltschema und Wirkungsweise der  $\Delta I$ -Regelung [GRO94]

Abbildung 2.1.2-4: Schematische Darstellung eines primär getakteten Schweißumrichter [RUG93]

[AIC14] eingeführte Schweißprozess wurde erst durch TANNHEIM mittels Einzelbild-Röntgenaufnahmen als Lichtbogenschweißverfahren erkannt [TAN42].

Der Lichtbogen brennt beim UP-Schweißen zwischen einer abschmelzenden Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff, für das Auge nicht sichtbar, unter einer Schicht körnigem Pulver. In Abbildung 2.1.2-5 ist das Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens dargestellt. Das Pulver bildet durch die Schweißwärme eine elastische Hülle aus flüssiger Schlacke, welche sich über die schmelzflüssige Schweißnaht legt und diese formt. Dabei übernimmt das Schweißpulver dieselben Aufgaben wie die Umhüllung von Stabelektroden. Zum einen schützt das Pulver das Schmelzbad vor Atmosphäre und zum anderen erhöht es die Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke, um ein besseres Zünden

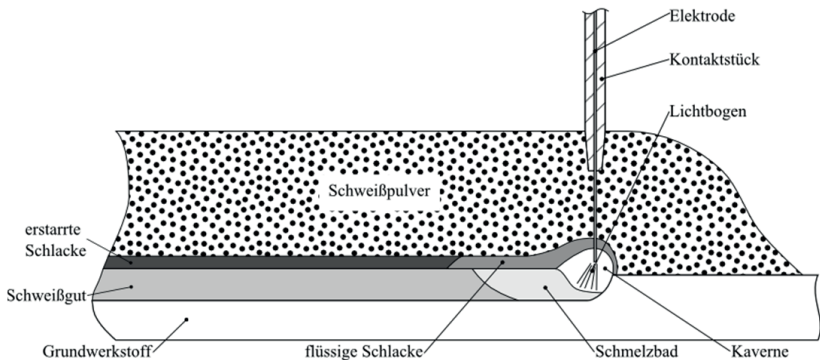


Abbildung 2.1.2-5: Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens

und einen stabilen Lichtbogen zu erreichen. Weiterhin kann das Pulver desoxidierend auf das Schweißgut wirken und in seltenen Fällen zum Legieren genutzt werden. In der Praxis hat sich für den Pulververbrauch der Vergleich zur abgeschmolzenen Drahtmenge ( $\text{kg Pulver/kg Draht}$ ) durchgesetzt, da somit eine Kalkulationsgröße geschaffen ist. Der Pulververbrauch ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Einerseits wird dieser durch die elektrischen Parameter sowie die Schweißgeschwindigkeit und andererseits durch die Körnung, also dem Schüttgewicht, bestimmt [KIL78].

Die Drahtelektrode wird dem Schweißprozess kontinuierlich von einer Haspel zugeführt. Es bildet sich aus Metaldämpfen und verdampften Schweißpulver eine Kaverne, die sowohl durch das geschmolzene Pulver (Schlacke) als auch durch den Grundwerkstoff bzw. das Schmelzbad begrenzt wird. Während des Schweißprozesses spielen sich metallurgische Vorgänge im Tropfenstadium, zwischen dem Schweißpulver und Schmelzbad sowie im Bereich der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff ab. Des Weiteren laufen physikalisch-chemische Prozesse infolge von Metall-Schlacke- und Metall-Gas-Reaktionen ab. Diese beeinflussen die chemische Zusammensetzung und die Metallurgie des Schweißgutes.

Verfahrensbedingt stellt das UP-Schweißen einen Hochleistungsschweißprozess dar ( $\text{Abschmelzleistung} > 8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ) und wird vorwiegend bei der Verarbeitung von Blechen ab einer Dicke  $> 8 \text{ mm}$  eingesetzt. Es ist aber auch möglich, geringere Blechdicken zu schweißen. Untersuchungen in [DIL80] ergaben, dass ein Schweißen von Blechen mit Dicken von 4 und 6 mm möglich ist. Bei geringen Steghöhen und Blechdicken ist zu beachten, dass eine Badsicherung vorgesehen werden muss. Diese sind beispielsweise ein untergelegter Blechstreifen, eine Kupferschiene, ein Pulverkissen oder eine keramische Badsicherung [MAT08].

Im Gegensatz zum MSG-Schweißen, welches in allen Schweißpositionen relativ einfach beherrschbar ist, wird das UP-Schweißen i. d. R. in Wannen- (PA), Horizontal- (PB) und in Querposition (PC) [DIR04, DIR05, HEN13] eingesetzt. Da das Halten des Pulvers infolge der Gravitation Überkopf durch eine Vorrichtung in Form von beispielsweise Formgleitstücken oder -scheiben (Abbildung 2.1.2-6) geschehen muss, ist das Schweißen in PD und PE Position nur erschwert möglich [KUP91, SCHA88, NN83, NN08.1, PAT58, KLO13].

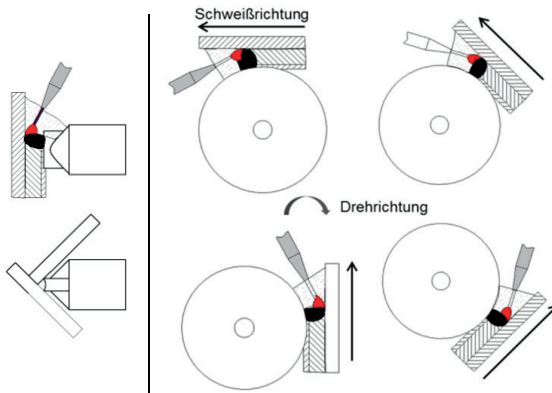


Abbildung 2.1.2-6: Varianten zum UP-Zwangslagenschweißen, links: Formgleitstück; rechts: Formscheibe

Aufgrund der Teilmechanisierung des UP-Verfahrens ist die Anlagentechnik gegenüber der des MSG-Schweißens aufwendiger. Zusätzlich zu Schweißmaschine, Drahtvorschubeinheit, Richtwerk und Schweißbrenner werden zur Realisierung der Schweißbewegung Portale, Masten oder Balkenfahrwerke benötigt.

Die Schweißmaschinen für das UP-Schweißen mit Gleichstrom sind i. d. R. Gleichrichter mit einer  $\Delta U$ -Regelung (CC-Charakteristik) oder  $\Delta I$ -Regelung (CV-Charakteristik). Eine  $\Delta U$ -Regelung auch „äußere Regelung“ genannt, wird für Schweißstromquellen mit stark fallender Kennlinie verwendet (siehe Abbildung 2.1.2-7), d. h. mit zunehmender Stromstärke nimmt die Spannung stark ab. Eine Spannungsschwankung, die durch eine Änderung der Lichtbogenlänge erzeugt wird, resultiert in einer Anpassung der Drahtfördergeschwindigkeit. Aufgrund der mechanischen Trägheit des Drahtvorschubsystems kommt diese Regelung beim UP-Schweißen von Elektroden mit Durchmessern  $> 2,4$  mm und geringen Drahtfördergeschwindigkeiten zum Einsatz. Bei höheren Drahtvorschubraten, die bei Verwendung von Elektroden mit Durchmessern



$< 2,4 \text{ mm}$  auftreten, wird die  $\Delta I$ -Regelung auch „innere Regelung“ eingesetzt. Hier arbeitet die Schweißmaschine mit einer fast waagerechter Kennlinie (siehe Abbildung 2.1.2-3). Bei dieser Regelung bleibt die Drahtvorschubgeschwindigkeit konstant. Tritt eine Änderung der Lichtbogenlänge auf, wird ein Regelungsprozess der Stromquelle ausgelöst. Es ändert sich die Schweißstromstärke. Diese Regelung arbeitet sehr schnell und wird deshalb beim Schweißen von dünnen Drahtelektroden [DOR86] und zum Bandauftragsschweißen genutzt.

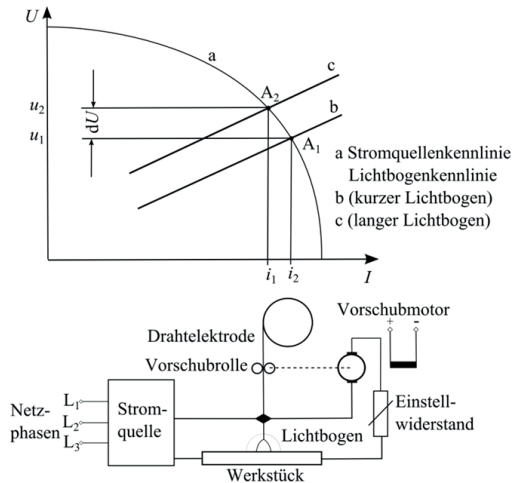


Abbildung 2.1.2-7: Schaltschema und Wirkungsweise der  $\Delta U$ -Regelung [GRO94]

Ein Schweiß-Gleichrichter besteht im Wesentlichen aus einem Transformator, einem nachgeschalteten Diodensatz, einer Drosselspule und einer Steuerelektronik. Der Transformator dient zur Umwandlung der aus dem Stromnetz entnommenen Spannung und Stromstärke auf ein zum Schweißen geeignetes Niveau. Man unterscheidet die Transformatoren nach ihrer Verstellmöglichkeit. Bei kleineren Transformatoren erfolgt die Spannungseinstellung durch eine Spulenanzapfung oder durch Stufenschalter. Die einfachste Variante ist eine primärseitige Stufenschaltung. In Abbildung 2.1.2-2 ist ein Transformator mit primär- und sekundärseitiger Verstellung dargestellt. Die Verstellung bei größeren Transformatoren wird durch mechanisches Verschieben des Streukerns mit Hilfe von elektromotorischen Antrieben (siehe Abbildung 2.1.2-8) oder durch Transduktoren realisiert. Der Transduktor besitzt eine Steuerwicklung, die mittels Gleichstrom den induktiven Widerstand der Arbeitswicklung beeinflusst

und lässt dadurch eine stufenlose Spannungsverstellung zu (siehe Abbildung 2.1.2-9).

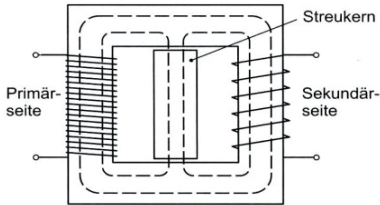


Abbildung 2.1.2-8: Aufbau eines Transformators mit Streukern [MAT02]

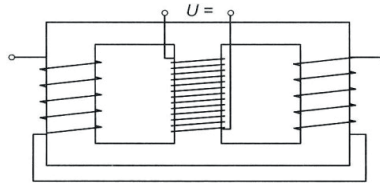


Abbildung 2.1.2-9: Aufbau eines Transduktors [MAT02]

Der Diodensatz realisiert die Gleichrichtung des Stromes. Heute werden Thyristor-Schweißgleichrichter zum UP-Schweißen eingesetzt. Ein Thyristor ist eine steuerbare Diode. Durch den Thyristor ist es möglich, den Durchlass der positiven Halbwelle so zu öffnen bzw. zu schließen, dass nur Teile der Wechselstromhalbwelle durchgelassen werden. Die zeitliche Begrenzung des Stromflusses wird als Phasenschnitt bezeichnet. Eine stufenlose Kennlinienverstellung ist damit möglich. Die nachgeschaltete Drosselspule glättet die Welligkeit der „abgeschnittenen“ Ströme. In Abbildung 2.1.2-10 ist das Blockdiagramm einer Thyristor-Schweißstromquelle dargestellt.

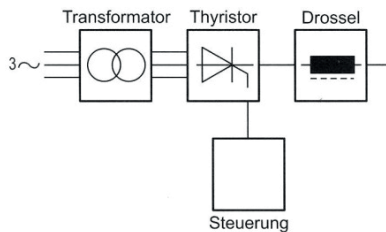


Abbildung 2.1.2-10: Blockdiagramm einer Thyristor-Schweißstromquelle [MAT02]

Mit einem solchen Thyristor kann weiterhin der aus dem Netz entnommene elektrische Strom so durchgelassen werden, dass ein Schweißen mit Wechselstrom möglich ist. Der Wechselstrom muss dann einen nahezu senkrechten Nulldurchgang aufweisen, um ein schnelles Wiederzünden des Lichtbogens zu realisieren. Die Form des Stromes wird als „square wave“ bezeichnet. Anders als bei den Gleichstrommaschinen zum UP-Schweißen haben sich beim UP-

Wechselstromschweißen Invertermaschinen durchgesetzt. Mit diesen ist eine Vielzahl von Parameter variabel einstellbar. Die Abbildung 2.1.2-11 zeigt die Möglichkeiten der Einstellungen.

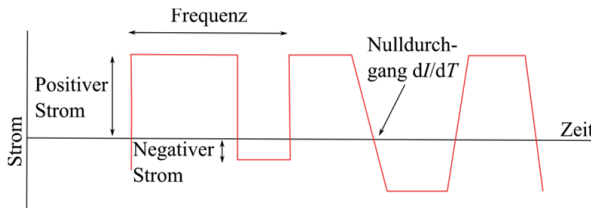


Abbildung 2.1.2-11: Einstellmöglichkeiten einer modernen UP-AC-Stromquelle  
Variation von: Stromstärke, positive Stromstärke, negative Stromstärke, Frequenz, Nulldurchgang  $dI/dt$ , Zeit [LIN01]

Das UP-Schweißen mit gepulstem Gleichstrom wurde erstmals in den 70er Jahren in [EIC78] erwähnt. Aufgrund der damaligen Stromquellentechnik konnten nur Ströme bis 600 A bereitgestellt werden. Deshalb war diese Verfahrensvariante nur für den Einsatz beim Fügen von dünnen Blechen ( $< 8$  mm) einsetzbar. Es wurde von sehr guten Schweißergebnissen bei einer Frequenz von 50 Hz berichtet. Es konnte gezeigt werden, dass eine Stabilisierung des UP-Prozesses möglich ist. Eine gezielte Tropfenablösung konnte damals aufgrund der Stromquellentechnik nicht realisiert werden.

### 2.1.3 Ausgewählte Verfahrensvarianten und Technologien

Die Vielfalt der Verfahrensvarianten beim MSG-Schweißen ist ähnlich mannigfaltig wie die beim UP-Schweißen. In diesem Kapitel soll nur ein kleiner Überblick über die Standard-, modifizierten Kurz- und Impulslichtbögen, die Hochleistungs-MSG-Verfahrensvarianten sowie über einige ausgewählte Varianten zur Leistungssteigerung beim UP-Schweißen gegeben werden. Auf Hybridprozesse wie das Plasma-MIG-, Plasma-MSG-Hybrid- und Laser-MSG-Hybrid-Schweißen wird nicht eingegangen.

Zur Verbesserung der Eigenschaften und zur Erhöhung der Produktivität des MSG-Prozesses wurden verschiedene Lösungsansätze verfolgt. Zum einen wurden technologische Änderungen am Gesamtprozess durch den Einsatz spezieller Gase (T.I.M.E.-Prozess) sowie Verfahrenskombinationen/-modifikationen vorgenommen und zum anderen durch Modulation der Prozessparameter Stromstärke und Spannung.

Die Verfahrensvariante des T.I.M.E.-Schweißen wird bei unlegierten und niedriglegierten Stählen unter Einsatz von Vierkomponentengas aus 65 % Ar, 26,5 % He, 8 %  $\text{CO}_2$  und 0,5 %  $\text{O}_2$  eingesetzt. Dabei werden Drahtvorschub-

geschwindigkeiten von über  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  eingestellt. Es bildet sich ein frei brennender Sprühlichtbogen bzw. rotierender Lichtbogen aus [BAC98].

Die Entwicklung im Bereich der Stromquellentechnik hat dazu geführt, dass sich modifizierte MSG-Lichtbögen industriell durchgesetzt haben. Bei Verwendung von Standard-Schweißmaschinen und Drahtelektroden mit Durchmessern  $< 2,4 \text{ mm}$  existieren die in Abbildung 2.1.3-1 dargestellten Lichtbogenarten.

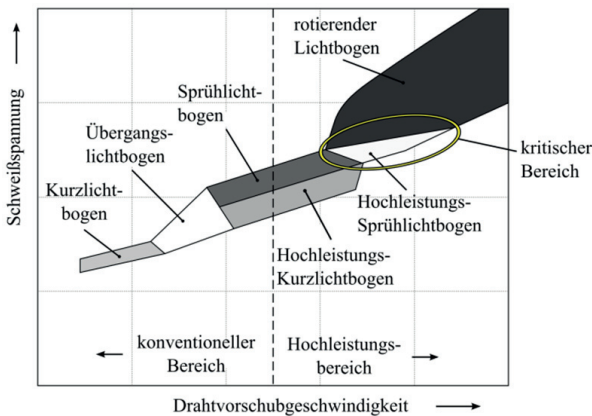


Abbildung 2.1.3-1: Lichtbogenarten beim MSG-Prozess [DVS0909-1]

Bei geringer Schweißleistung tritt im konventionellen Bereich der Kurzlichtbogen auf. Abbildung 2.1.3-2 zeigt dazu einen  $U/I$ -Verlauf einer Kurzlichtbogen-schweißung von Aluminium mit einer  $1,2 \text{ mm}$  Drahtelektrode und reinem Argon als Schutzgas. Im Diagramm ist der Stromanstieg in der Kurzschlussphase (Spannung fällt auf den Wert 0 ab) deutlich zu sehen. Der Stromanstieg führt zu einer Erwärmung des Drahtes. Dieser erweicht und wird schmelzflüssig, bis es zur Auflösung der Kurzschlussbrücke kommt. Der Lichtbogen zündet neu. Dabei steigt die Spannung an und die Stromstärke sinkt. Danach beginnt der beschriebene Verlauf wieder von vorn. Der Vorgang läuft periodisch ab. Mit modernen Schweißstromquellen werden die Stromstärke- und Spannungswerte zu modifizierten Kurzlichtbögen moduliert. Um den Energieeintrag ins Bauteil zu senken und hohe Leistungen beim Wiederezünden zu verhindern, werden diese Kurzlichtbögen u. a. stromquellenintern durch Anpassung der elektrischen Parameter geregelt. Dabei bleibt der Spannungsverlauf wie beim Standard-Kurzlichtbogen die Regelgröße und wird permanent gemessen. Die

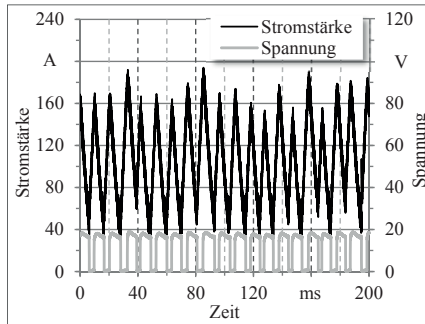


Abbildung 2.1.3-2:  $U/I$ -Verlauf beim Kurzlichtbogen-Schweißen von AlMg5  
 $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $I_s = 103 \text{ A}$ ,  $U_s = 11,7 \text{ V}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ ,  
 AlMg4,5; Schutzgas: 11

Stromstärke steigt hingegen beim Kurzschluss auf einen einstellbaren Wert an und wird dann abgesenkt. Zum Auflösen der Kurzschluss- und Werkstoffbrücke wird mit einem kurzen Strompuls die LORENTZ-Kraft erhöht und der Tropfen abgelöst. Dadurch ist die Zündung des Lichtbogens weich und nahezu spritzerfrei. Mit diesem modifizierten Kurzlichtbogen ist eine gute Spaltüberbrückbarkeit möglich und es lassen sich dünne Bleche verzugsarm fügen. Der  $U/I$ -Verlauf eines solchen Lichtbogens ist in Abbildung 2.1.3-3 dargestellt.

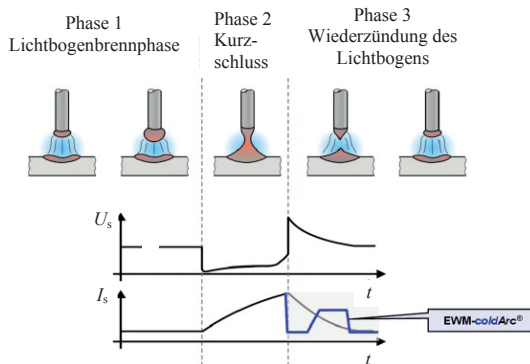


Abbildung 2.1.3-3:  $U/I$ -Verlauf beim EWM-coldArc®

Weiterhin wurde die Cold Metal Transfer (CMT®) -Technologie entwickelt. Das Spezielle an diesem Verfahren ist der gepulste, reversible Drahtantrieb, welcher sich direkt am Brenner befindet. Dieser Antrieb sorgt für eine definier-

te Rückwärtsbewegung des Drahtes (oszillierende Drahtbewegung) beim Kurzschluss. Die Drahtbewegung ist beim CMT<sup>®</sup>-Prozess direkt in die Prozessregelung eingebunden. Mit Hilfe des mechanischen Zurückziehens der Drahtelektrode wird der Kurzschluss aufgelöst. Somit sind keine überhöhten Kurzschlussströme notwendig, um die Werkstoffbrücke zu zerstören. Durch das geringere Niveau des Schweißstromes wird die Spritzerbildung reduziert und der Wärmeeintrag gesenkt. Im Anschluss bewegt sich der Draht wie gewohnt vorwärts und der Zyklus startet erneut. Die untere Leistungsgrenze des reinen CMT<sup>®</sup>-Prozesses wird dabei durch die geforderte Nahtausbildung und die obere Grenze durch den Beginn des Übergangslichtbogens bestimmt.

Durch eine Erhöhung der Schweißleistung erreicht man den Übergangslichtbogen. Hier finden sowohl kurzschlussbehaftete als auch kurzschlussfreie Werkstoffübergänge statt. Aufgrund des diskontinuierlichen Prozesses und der häufigen Spritzerbildung wird dieser Leistungsbereich in der Industrie selten genutzt. Zur Nutzung des Übergangslichtbogenbereiches wurde vor über vier Jahrzehnten der Impulslichtbogen entwickelt. Hierbei wird die abschmelzende Elektrode und der Lichtbogen mit einem kurzen Stromimpuls von 0,1 bis 20 ms Dauer und einer Frequenz von 50 bis 300 Hz beaufschlagt. Um das Erlöschen des Lichtbogens zu verhindern wird durch die Schweißmaschine ein geringer Grundstrom zwischen den Strompulsen mit einer  $U/I$ - oder  $I/I$ -Regelung moduliert. Bei der  $U/I$ -Regelung wird in der Grundstromphase der Strom und in der Pulsstromphase die Spannung geregelt. Bei der  $I/I$ -Regelung wird sowohl in der Grund- als auch in der Pulsstromphase der Strom vorgegeben [JÜT99]. Durch das Ansteigen des Stromes (Impuls) erfolgt eine Steigerung der Stromdichte und der radialen Einschnürung des Lichtbogens durch das Magnetfeld (Pinch-Effekt). Die LORENTZ-Kraft schnürt das schmelzflüssige Elektrodenende ein und führt zur Tropfenablösung. Durch die richtige Einstellung der Prozessparameter wird ein Tropfen pro Impuls nahezu spritzerfrei abgelöst [MAT91, LAN86]. Dabei spielt auch die Wahl des richtigen Schutzgases eine Rolle [KIL93.1, WEL89]. Abbildung 2.1.3-4 zeigt die Tropfenablösung sowie den  $U/I$ -Verlauf einer DC-Impulslichtbogen-schweißung mit einer 1,2 mm Duplex-Stahl-Drahtelektrode und reinem Argon als Schutzgas. Die Gesamtschweißleistung ist beim Impulsschweißen gegenüber Standard-Prozessen größer, da die Lichtbogenspannung höher ist. Ein Wechsel der Polarität in der Grundstromphase führt dazu, dass die Energieanteile (Aufschmelzwärme des Grund- und Zusatzwerkstoffes) verschoben werden. Abbildung 2.1.3-5 zeigt einen  $U/I$ -Verlauf mit den entsprechenden Einzelbildern der Hochgeschwindigkeitsaufnahme, bei dem in der Grundstromphase die Polung geändert wird. Der Negativanteil sorgt für eine Reduzierung des Wärmeeintrages in das Bauteil und erhöht die Abschmelzleistung bei geringfügiger Abnahme des Einbrandes [LAN03].

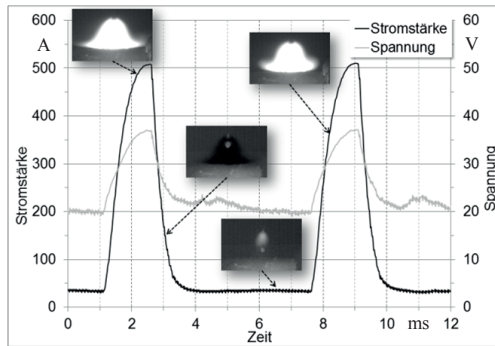


Abbildung 2.1.3-4:  $U/I$ -Verlauf und Tropfenablösung einer DC-Impulsschweißung  
 $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $P = 3850 \text{ W}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , G 22 9 3 NL;  
 Schutzgas: I1

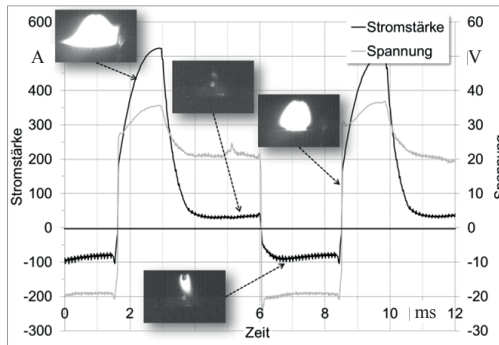


Abbildung 2.1.3-5:  $U/I$ -Verlauf und Tropfenablösung einer AC-Impulsschweißung  
 $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $P = 4130 \text{ W}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , G22 9 3 NL;  
 Schutzgas: I1

Aufgrund der guten Automatisierbarkeit des MSG-Schweißens und der voll-elektronischen digitalen Schweißgeräte konnten sich moderne MSG-Hochleistungsvarianten entwickeln. Diese teilen in modulierte Hochleistungslichtbögen, Tandem-Schweißen und Doppeldrahtschweißen ein [SCHM13]. Das DVS Merkblatt 0909-1 gibt dazu die in Abbildung 2.1.3-6 dargestellte Einteilung.

Beim modulierten Hochleistungslichtbogen wird beim Erlöschen des Lichtbogens der Schweißstrom aufgrund der digitalen Steuerung sehr schnell heruntergefahren, bis die programmierte Lichtbogen Spannung wieder erreicht ist. Der

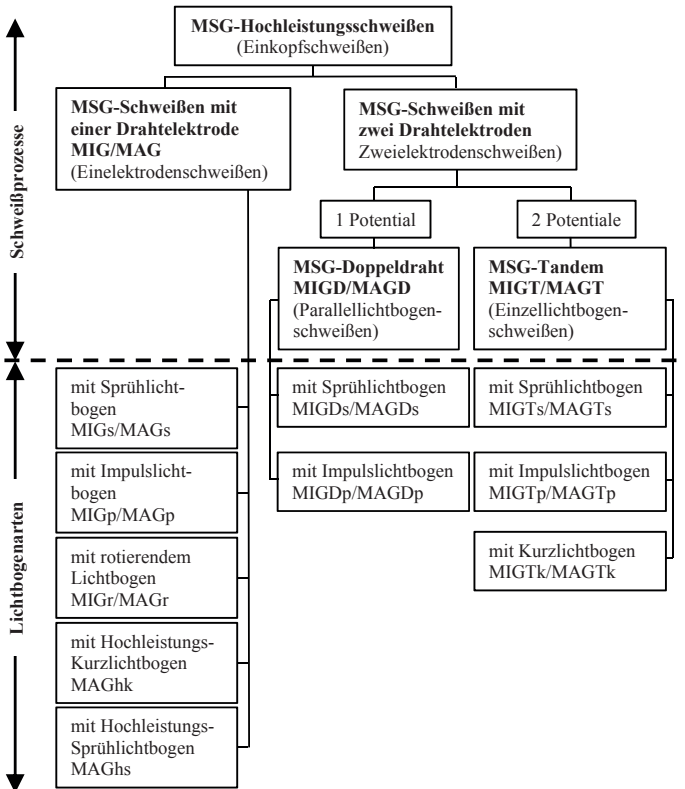


Abbildung 2.1.3-6: Einteilung und Bezeichnung der Prozessvarianten des MSG-Hochleistungsschweißens [DVS909-1]

Werkstoffübergang erfolgt fein bis mitteltropfig [BUD06].

Beim MSG-Tandemschweißen schmelzen zwei Drahtelektroden mit jeweils einem Potential ab. Hierzu können sowohl Kurzlicht- als auch Sprühlichtbögen eingesetzt werden. Es sind alle gängigen Lichtbogenvarianten kombinierbar [EGE12, ROß13]. Zur Reduzierung der gegenseitigen Beeinflussung der Lichtbögen wird mit Impulslichtbogen gearbeitet. Dazu werden zwei Schweißmaschinen mit einer „Master-Slave“-Kopplung verwendet. Die Impulse sind phasenversetzt [APP02, NEN00, JÖB00]. Mit dieser Verfahrensmodifikation sind Abschmelzleistungen bei Stahl von  $16 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  realisierbar. Die Schweißgeschwindigkeiten können bei Längsnähten  $250 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  und bei Rundnähten sogar  $400 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  betragen [TRO02].



Das Verfahrensprinzip des Doppeldrahtschweißens ist ähnlich des Tandem-Schweißens. Der Unterschied ist, dass die zwei Drahtelektroden ein gemeinsames Potential tragen. Zu beachten ist, dass sich die Lichtbögen gegenseitig beeinflussen und ein gewisser Abstand eingehalten werden muss. Es sind damit Abschmelzleistungen von  $25 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  und Schweißgeschwindigkeiten von  $300 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  möglich [KNO95].

Die Möglichkeit zur Leistungssteigerung durch Verwendung von „dickeren“ Drahtelektroden beim MAG-Schweißen mit  $\text{CO}_2$  wurde in [ERN66] untersucht. Die Autoren konnten feststellen, dass bei Steigerung des Drahtdurchmessers eine Erhöhung Lichtbogenspannungen (Draht-Ø 1,6 mm, 20 - 30 V; Ø 3,0 mm, 44 - 46 V) notwendig ist, um einen kurzschlussfreien Werkstoffübergang zu realisieren. Grenzen des Schweißstromes für eine 1,6 mm Elektrode von 900 A wurden ermittelt. Höhere Abschmelzleistungen ließen sich aufgrund der großen Schmelzbäder nicht erreichen. In [PRO76] wird darauf hingewiesen, dass gute Ergebnisse mit Strömen bis 1200 A ohne Prozessstörungen erreichen werden konnten. Querschliffe oder Übersichtsaufnahmen werden in der Quelle aber nicht gezeigt. In [SCHE85] wird davon berichtet, dass bei 4,0 mm Drahtelektroden zwischen 270 und 2500 A ein grobtropfiger Werkstoffübergang stattfindet. Aussagen über Prozessstabilität und die erzeugten Schweißnähte werden nicht getroffen. [LES58.1] stellte fest, dass die Strahlung des Lichtbogenplasmas und des Schmelzbades sowie die Lichtbogenspannung (Lichtbogenlänge) bei Stahlwerkstoffen nur geringfügigen Einfluss auf die Abschmelzleistung nehmen. Als die vier wesentlichen Wärmequellen, die die Abschmelzleistung beeinflussen sieht der Autor die Anode, Kathode, den elektrischen Widerstand der Elektrode und die Strahlungswärme, wobei die Wärmequellen von der Schweißstromstärke und des Drahtdurchmessers abhängen. Als weiteren Einflussfaktor auf die Abschmelzleistung wird die Widerstandserwärmung im Draht genannt, welche vom Drahtdurchmesser, Stick-out, Schweißstromstärke und der chemischen Zusammensetzung bestimmt wird. Mit zunehmender Erhöhung des Stick-outs werden die Temperaturen am Drahtende so groß, dass der Draht ohne Einwirkung des Lichtbogens schmilzt. So führt beispielsweise eine Steigerung des Stick-outs von 10 auf 20 mm beim MAG-Schweißen mit einer 1,2 mm Elektroden zu einer Senkung der Stromstärke von 600 auf 400 A bei gleicher Abschmelzleistung.

Beim UP-Eindrahtschweißen wird eine Drahtelektrode vorwiegend von der Wärme des Lichtbogens und der Widerstandserwärmung im freien Drahtende abgeschmolzen [FRA68]. Geläufige Drahtdurchmesser sind 2,5 bis 6 mm [MAT08]. Die Drahtelektrode wird i. d. R. mit Gleichstrom abgeschmolzen und ist Anode.

Es wird erwartet, dass sich beim MSG-Dickdraht-Schweißen ähnliche Zusammenhänge zwischen Lichtbogen und Schmelzbad ergeben wie beim UP-

Schweißen. Deshalb ist die Betrachtung technologischer Größen, wie Einbrandtiefe und Schweißnahtausbildung von Bedeutung. Abbildung 2.1.3-7 zeigt den Einfluss der Stromstärke  $I_s$  auf die Ausbildung der Nahtform.

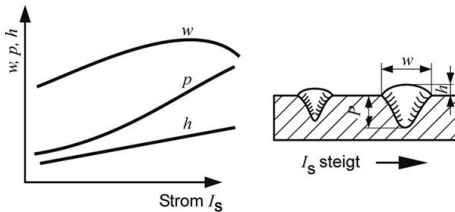


Abbildung 2.1.3-7: Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung [RUG93]

Die Stromstärke beeinflusst die Einbrandtiefe und die Nahthöhe sowie den Zu- und Abbrand von Legierungselementen. Außerdem werden die mechanisch-technologischen Gütewerte der Schweißnaht beeinflusst. Darüber hinaus kann beispielsweise ein ungünstiges Nahtbreite ( $w$ ) /-tiefe ( $p$ ) -Verhältnis zu Heißrissen führen (Abbildung 2.1.3-8).

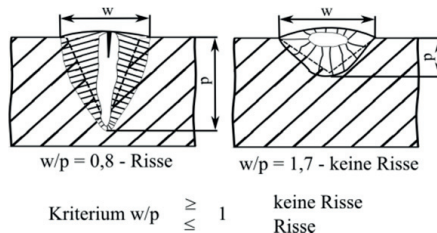


Abbildung 2.1.3-8: Günstige (rechts) und ungünstige (links) Raupengeometrie beim UP-Schweißen [HER89]

Die Schweißspannung hat nur geringe Auswirkungen auf den Einbrand und die Abschmelzleistung. Eine Spannungsänderung wirkt sich im Wesentlichen auf die Schweißnahtbreite aus. So ergibt eine höhere Spannung eine breitere Schweißnaht.

Deutlich größere Einflüsse auf Einbrandtiefe und Abschmelzleistung hat die Polung der Elektrode und die verwendete Stromart. Eine Minuspolung der Elektrode führt zu einer Steigerung der Abschmelzleistung [PAT56, SCHA62, DIR05]. Die Ursache hierfür liegt im instabilen brennenden Lichtbogen, dessen Ansatzpunkt an der abschmelzenden Elektrode wandert. Dadurch wird eine größere Wärmewirkung auf den Zusatzwerkstoff ausgeübt, was eine höhere Abschmelzleistung nach sich zieht [DUC66].

Wie bereits erwähnt besteht eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Abschmelzleistung in der Erhöhung des Stick-outs. Dabei ist zu beachten, dass eine Führung des Schweißdrahtes zur Schweißstelle vorgesehen werden muss. Aufgrund der Krümmung des Drahtes kann es dazu kommen, dass der Lichtbogen, der am Ende der Elektrode brennt, nicht die zu fügende Stelle trifft. Mit einer Umpolung der Elektrode und einer Erhöhung des Stick-outs von 30 auf 120 mm kann die Abschmelzleistung verdoppelt werden [LUK01]. Engel [ENG72] führte Untersuchungen durch, die eine Bestimmung der Temperatur im Schweißdraht infolge der Widerstandserwärmung ermöglicht. Dazu verwendet er den in Abbildung 2.1.3-9 dargestellten Versuchsaufbau. Für diese Messung wird ein Drahtröhrchen mit einem Außendurchmesser von 4 mm und einem Innendurchmesser von 1,6 mm eingesetzt. In das „Rohr“ wird ein NiCr/Ni-Thermoelement eingebracht. Der Kontaktrohrabstand hat den größten Einfluss auf die Erwärmung des Drahtes. Das Diagramm der Abbildung 2.1.3-10 zeigt den Temperaturverlauf für verschiedene Stick-outs. Es ist zu sehen, dass sich durch eine Erhöhung des freien Drahtendes eine größere Erwärmung des Drahtes einstellt. Ein Vergleich der Kurven und eine genaue Ermittlung des Spannungsabfalls ist aber nur bedingt möglich, da der Lichtbogenansatz und der Stromübergang im Kontaktrohr lokal nicht exakt bestimmt werden kann. Für die praktische Anwendung ist die Drahtführung bei großem Stick-out schwierig und deshalb nur bedingt einsetzbar.

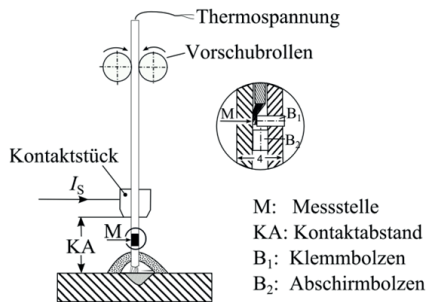


Abbildung 2.1.3-9: Versuchsanordnung zur Messung der Temperatur im Schweißdraht [ENG72]

Das UP-Schweißen mit Wechselstrom ist prozesssicher durchführbar [MAG91]. Es kann ebenfalls zur Steigerung der Abschmelzleistung eingesetzt werden [DIR06]. Jedoch ist zu beachten, dass durch den Einsatz von Wechselstrom die Einbrandtiefe sinkt. Die Amplitudenbalance (Abbildung 2.1.3-11 links) und die Zeitbalance (Abbildung 2.1.3-11 rechts) können dazu genutzt werden, die Nahtbreite sowie die Einbrandtiefe zu beeinflussen.

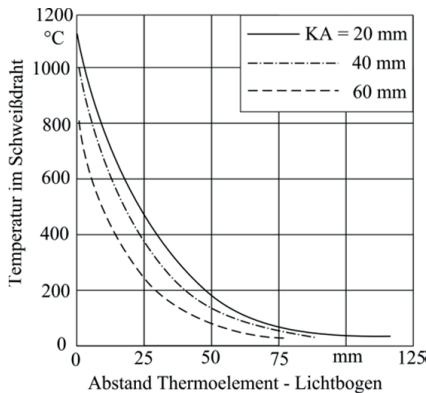


Abbildung 2.1.3-10: Axiale Temperaturverteilung im Schweißdraht bei unterschiedlichen Kontaktrahabständen [ENG72]

$$I_s = 550 \text{ A}, U_s = 30 \text{ V}, v_s = 50 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$$

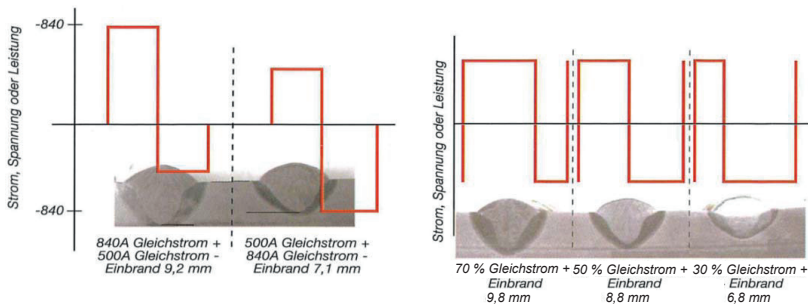


Abbildung 2.1.3-11: Schweißnahtgeometrie; Einfluss der Strombalance (links) und der Zeitbalance (rechts) [LIN01]

In [DUC66] wurde festgestellt, dass mit einer Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit von 15 auf  $60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  eine Senkung der spezifischen Abschmelzleistung um 50 % von 24 auf  $16 \text{ g} \cdot (\text{A} \cdot \text{h})^{-1}$  einhergeht. Darüber hinaus ist der Drahtdurchmesser ein entscheidender Faktor für die Abschmelzleistung. Für eine hohe Abschmelzrate sind geringe Durchmesser aufgrund der höheren Stromdichte von Vorteil [LUK01]. Jedoch ist die maximale Strombelastung der Drähte begrenzt. So sollte beispielsweise eine 2,0 mm Elektrode mit maximal 380 A und eine 4,0 mm Elektrode mit max. 600 A belastet werden [HAD04]. Durch eine zusätzliche Wärmequelle kann die Elektroden vorgewärmt werden, was zu einer Erhöhung der Abschmelzleistung um 40 bis 60 % führt [BUR79]. Das UP-Impulsschweißen erstmals in [EIC78] untersucht und hat sich industriell nicht durchgesetzt. In neueren Untersuchungen wurde die Thematik in

[REI14, REI15] wieder aufgegriffen. Die Autoren gehen davon aus, dass sich aufgrund der niedrigen Grundstromphasen eine Verkleinerung der Kavernengröße realisieren lässt, was zu einer geringeren Aufschmelzung von Schweißpulver führen und den diffusible Wasserstoffgehalt im Schweißgut senken soll. Zum niederfrequenten gepulsten UP-Gleichstromschweißen stellte Caloun in [CAL93] ein mathematisches Modell zur Ermittlung der Wärmeausbreitung auf.

Einige Vorteile ergeben sich durch den Einsatz von Fülldrahtelektroden, die Ende der 60er Jahre Einzug in die Schweißtechnik hielten [ENG94]. Das Diagramm in Abbildung 2.1.3-12 zeigt den Vergleich der Abschmelzleistung zwischen Massivdraht (MD 105) und Fülldraht (FC 35.25), die mit Gleich- (G+) und Wechselstrom ( $\approx$ ) verschweißt wurden. Es zeigt sich eine deutlich höhere Abschmelzleistung für den Fülldraht bei gleicher Schweißstromstärke. Beim Schweißen von Fülldrähten fließt der elektrische Strom zum größten Teil über den Mantel (Hülle) des Drahtes. Abhängig von der Füllung fließt bei Metallpulverfülldrähten ein Teilstrom im Inneren des Drahtes. Die mineralischen Bestandteile einer basischen oder rutilen Füllung leiten den elektrischen Strom nicht. Aus der Gleichung (1) wird ersichtlich, dass mit einer Verkleinerung der Querschnittsfläche  $A_{\text{Draht}}$  der Drahtelektrode bei gleicher Stromstärke  $I_s$  eine Steigerung der Stromdichte  $J$  einhergeht.

$$J = \frac{I_s}{A_{\text{Draht}}} \quad (1)$$

Weitere Vorteile gegenüber Massivdrähten sind der Einsatz bei niedrigen Stromstärken und eine höhere Strombelastbarkeit. Darüber hinaus sind hervorragende mechanisch-technologische Gütewerte des Schweißgutes erreichbar. Die genannten positiven Auswirkungen steigern somit die Wirtschaftlichkeit [GEH99, ENG05].

Zur Leistungssteigerung des UP-Verfahrens bieten sich eine Vielzahl von Verfahrensmodifikationen an. Im Folgenden soll dazu ein kurzer Überblick gegeben werden. Eine schematische Darstellung des UP-Kalt- und Heißdrahtschweißens zeigt Abbildung 2.1.3-13. Durch die Zuführung eines Kaltdrahtes kann die Abschmelzleistung um ca. 1/3 vergrößert werden. Der stromlose Kaltdraht wird hinter dem stromgeführten Draht zum Lichtbogen befördert. Dadurch ist eine deutliche Minderung des Einbrandes zu verzeichnen, da der Kaltdraht im Bereich des Schmelzbades abgeschmolzen wird und somit dem Lichtbogen einen Teil seiner thermischen Energie entzieht. Aus diesem Grund eignet sich das UP-Kaltdrahtschweißen besonders für Auftrag- und Füllschweißungen.

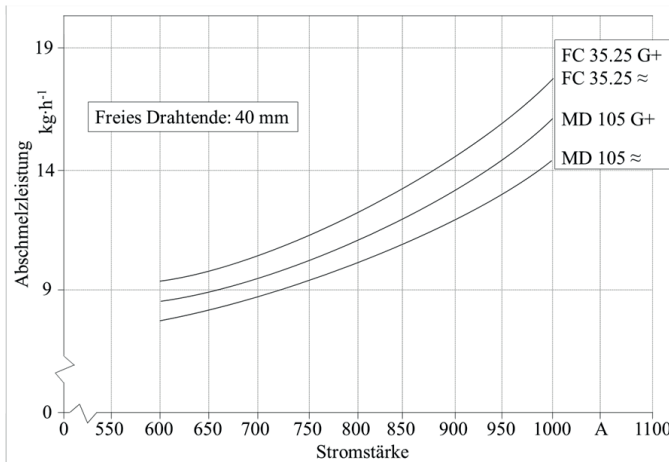


Abbildung 2.1.3-12: Abschmelzleistung in Abhängigkeit von Stromstärke und -art beim UP-Schweißen von Massiv- und Fülldrähten mit gleichem Durchmesser [ENG94]

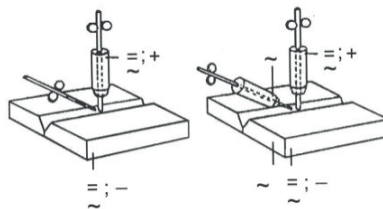


Abbildung 2.1.3-13 Schematische Darstellung des UP-Kalt- (links) und Heißdrahtschweißen (rechts) [MAT08]

Ebenso reduziert die verringerte Wärmeeinbringung den Winkelverzug. Bei zu hohen Fördergeschwindigkeiten des Kaltdrahtes kann es jedoch zur Bildung eines Trichters kommen. Druck, der durch die Oberflächenspannung zwischen Kaltdraht und Schmelzbad entsteht, wird infolge der lokalen Abkühlung durch die Kaltdrahtelektrode noch verstärkt und fördert die Zufuhr von Schlackenteilchen bis tief in das Schmelzbad. Der Durchmesser des Kaltdrahtes muss an die Prozessparameter, also an die Wärmeeinbringung, angepasst werden. Bei zu dünnen Drähten können Prozessstörungen und Vibrationen auftreten. Es besteht weiterhin die Gefahr, dass der Draht nicht aufgeschmolzen wird und aus dem Schmelzbad herausschießt [ARE08, REI08]. Aus [LUK01] ist bekannt,

dass sich die Abschmelzleistung mit einem zusätzlichen Kaltdraht ( $\varnothing$  2,5 mm) und einer Schweißstromstärke von 700 A am stromführenden Draht um  $3,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  erhöht. Dies bedeutet nach Gleichung (2), dass dafür eine Leistung von etwa 900 W notwendig ist. Vereinfacht ist für  $\Delta T$  ein Wert von 1800 K und für die spezifische Wärmekapazität von Stahl  $490 \text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$  angenommen.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Eine Erhöhung der Abschmelzleistung gegenüber dem Eindrahtschweißen kann durch die Zuführung eines Heißdrahtes realisiert werden. Der Heißdraht wird ohne Lichtbogen, aber mit einer zweiten Stromquelle und geringer Spannung (etwa 14 V) sowie einer Stromstärke von 150 A bis auf Rotglut ( $T = 700 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mittels Widerstandserwärmung vorgewärmt [MAT08]. Dabei schmilzt der zusätzliche Draht wie beim Kaltdrahtschweißen im Lichtbogen auf und entzieht dem Lichtbogen Energie. Bei einer 65 % höheren Abschmelzleistung gegenüber dem Eindrahtschweißen ist ein um 10 % höherer Energiebedarf notwendig. Dadurch steigt die Wärmeeinbringung lediglich 10 % an [GRO94].

Das UP-Paralleldrahtschweißen ist seit über sechs Jahrzehnten bekannt und wird in der Praxis eingesetzt [KNI54, CLA52, KUB56, HEI67]. Dabei werden i. d. R. zwei Drähte (Doppeldrahtschweißen) über ein Potenzial abgeschmolzen. Dazu wird ein doppeltes Kontaktrohr verwendet. Abbildung 2.1.3-14 zeigt diese Verfahrensvariante. Die Drahtdurchmesser variieren von 1,2 bis 2,5 mm.

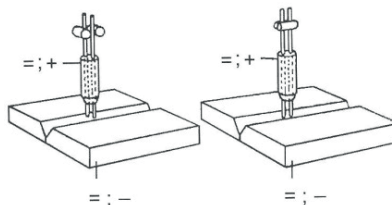


Abbildung 2.1.3-14: UP-Doppeldraht-Schweißen, links: Diagonalanordnung, rechts: Hintereinander [NN04]

Die Drahtfördergeschwindigkeiten sind gegenüber dem Eindrahtschweißen um ein Vielfaches höher. Dadurch ist die Abschmelzleistung größer. Der Vergleich zwischen dem Eindrahtschweißen mit einer 4 mm Elektrode und dem Doppeldrahtschweißen mit  $2 \times 1,2 \text{ mm}$  Elektroden und gleicher Stromstärke zeigt, dass die Abschmelzleistung beim Eindrahtschweißen etwa  $6,5$  bis  $7 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  und beim Doppeldrahtschweißen etwa  $12 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  beträgt (Abbildung 2.1.3-15). Die Drahtfördergeschwindigkeit beim Eindrahtschweißen ist etwa  $1,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  und beim Doppeldrahtschweißen  $12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

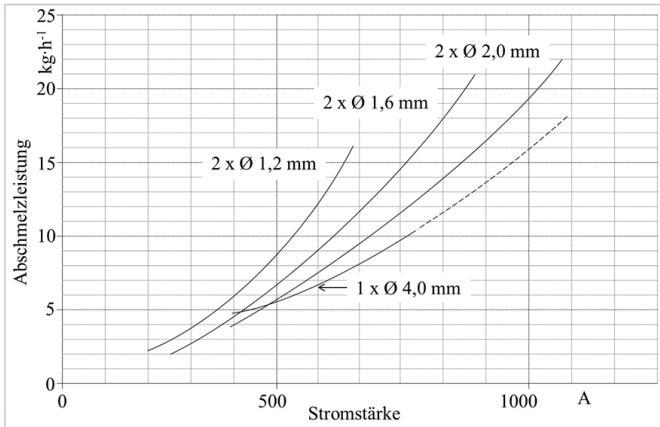


Abbildung 2.1.3-15: Abschmelzleistung von niedrig legierten Drähten beim UP-Doppel-drahtschweißen [HER89]

Mit dem UP-Paralleldrahtschweißen können nicht nur zwei, sondern bis zu sechs Drähte abgeschmolzen werden. Abbildung 2.1.3-16 zeigt dazu mögliche Drahtanordnungen im Kontaktrühr. Die hohe Abschmelzleistung beim UP-Paralleldrahtschweißen wird infolge der hohen Energiedichte realisiert. Durch

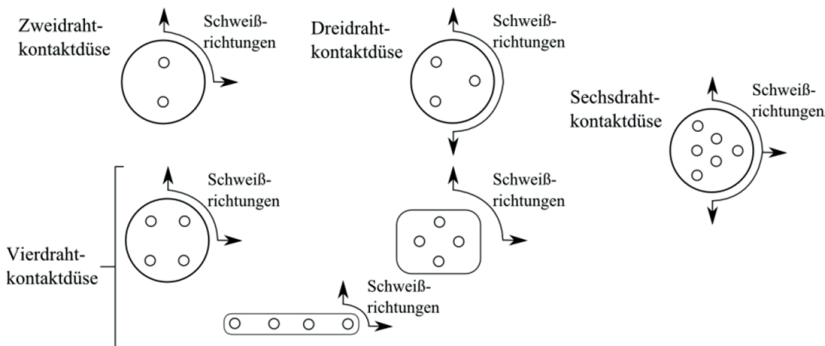


Abbildung 2.1.3-16: Mögliche Anordnungen beim UP-Paralleldrahtschweißen [TUS99, TUS02]

das Springen des Lichtbogens werden der Einbrand und die Aufmischung gegenüber dem Einzeldrahtschweißen verringert. Je nach Schweißgeschwindigkeit ist die Wärmeeinbringung geringer und somit auch der Verzug. Dies senkt die Gefahr der Heißrissbildung [HER89]. Kombinationen von UP-



Paralleldrahtschweißen und UP-Schweißen mit Kaltdrahtzuführung sind ebenfalls am Markt erhältlich. ESAB stellt in [SCHU14] den ICE<sup>®</sup>-Prozess vor. Hier wird zwischen den beiden Doppeldrahtelektroden (Abbildung 2.1.3-17) ein Draht kalt zugeführt. Dieser kann in seiner Fördergeschwindigkeit variabel eingestellt werden.

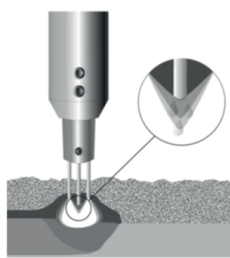


Abbildung 2.1.3-17: Prinzipskizze des ICE<sup>™</sup>-Prozess [SCH14]

Das UP-Mehrdrahtschweißen stellt ebenfalls eine Verfahrensvariante zur Erhöhung der Abschmelzleistung dar. Es werden mehrere Elektroden, die jeweils eine eigene Stromquelle und ein eigenes Drahtvorschubsystem besitzen, hintereinander angeordnet (Abbildung 2.1.3-18). Der Abstand der Elektroden reicht

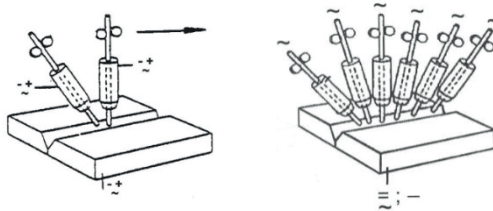


Abbildung 2.1.3-18: UP-Mehrdrahtschweißen; links: UP-Tandemschweißen, rechts: UP-Mehrdrahtschweißen mit 6 Elektroden [MAT08, REI08]

von 12 bis 25 mm unter Verwendung von einer Gleichstrom- und einer oder mehreren Wechselstromquellen. In [THI84] wird auf den Einfluss der Elektrodenabstände in Bezug auf die innere Schweißnahtausbildung und in [KIL83] auf die Kristallisation und Zähigkeitseigenschaften der Schweißverbindung eingegangen. Bei Verwendung von zwei Gleichstromquellen führt ein geringer Abstand zwischen den Elektroden dazu, dass die Lichtbögen aufgrund des sich um die Elektroden ausbildenden elektromagnetischen Feldes bei gleicher Polung zusammen geschnürt und bei unterschiedlicher Polung auseinander geblasen werden (siehe Abbildung 2.1.3-19). Größere Abstände (ab etwa 60 mm)

erzeugen bei Gleichstromschweißungen mit unterschiedlicher Polarität einen stabilen Schweißprozess [KIL82].

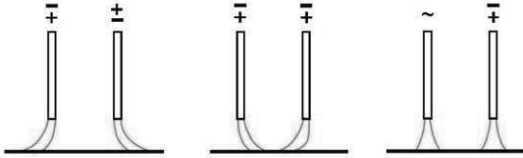


Abbildung 2.1.3-19: Blaswirkung infolge der elektromagnetischen Felder [REI08]

In der Praxis werden heute bis zu 6 Elektroden hintereinander angeordnet. Hier sind Abschmelzleistungen von bis zu  $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  möglich. Es ist zu beachten, dass bei dieser Verfahrensvariante eine erhöhte Wärmeeinbringung in den Grundwerkstoff stattfindet. Es wird am ersten Kopf mit Gleichstrom geschweißt, um einen tiefen Einbrand zu erhalten. Die restlichen Köpfe werden mit Wechselstrom versorgt. Um die Prozessstabilität zu gewährleisten, muss darauf geachtet werden, dass die Schweißköpfe mit Wechselstrom in unterschiedlichen Phasenlagen betrieben werden. Die Phasenfolge spielt dabei eine entscheidende Rolle [DVS915]. Bei der Mehrdrahttechnologie müssen aufgrund der hohen Wärmeeinbringung Schweißgeschwindigkeiten von bis  $3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  eingestellt werden. Hierfür sind geeignete Schweißpulver notwendig, um entsprechende Nahtqualitäten zu erreichen [NIE95]. Umfassende Untersuchungen zu mechanisch-technologischen Gütewerten von Mehrdrahtschweißungen gibt [BUR93, BUR96].

In [NN08.2] wird ein Unternehmen vorgestellt, welches das Verfahren UP-Twinarc-Tandemschweißen verwendet. Dieses Verfahren kommt bei der Fertigung von dickwandigen Bauteilen zum Einsatz. Es werden wie beim Tandemschweißen zwei Elektroden mit jeweils einem Potenzial hintereinander angeordnet. Der Unterschied besteht darin, dass zwei Doppeldrähte, die hintereinander angeordnet sind, verwendet werden. Somit können 4 Drahtelektroden ( $2 \times 2 \times \varnothing 2,4 \text{ mm}$ ) beim Schweißen von dicken Blechen verarbeitet werden. Dadurch werden die Schweißzeiten drastisch gesenkt. Beim UP-Twinarc-Tandemschweißen sind Abschmelzleistungen von bis zu  $35 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  möglich [DIR05]. Das UP-Mehrdrahtschweißen kann des Weiteren zum Engspaltschweißen eingesetzt werden. Dabei werden meist zwei Drähte in einer Tulpen- oder Steiflankennaht hintereinander abgeschmolzen. Gegenüber dem Eindrahtschweißen kann die Abschmelzleistung von etwa 7 auf bis zu  $16 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  gesteigert werden [SCHO10].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl beim MSG- als auch beim UP-Schweißen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Leistungssteigerung existiert.

tiert. Die größte Steigerung der Abschmelzleistung wird bei beiden Verfahren durch eine weitere oder mehrere zusätzliche Drähte realisiert. Sind die weiteren Elektroden potentialtragend, besteht die Gefahr der thermischen Überlastung des Grundwerkstoffes. Des Weiteren ist die Handhabung von mehreren Elektroden schwierig, was sich in Bezug auf die Prozessstabilität und -sicherheit auswirkt.

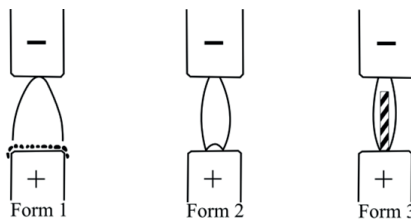
Der Vergleich der Verfahren UP mit MSG zeigt, dass derzeit für das Schweißen von Drahtelektroden mit größerem Durchmesser vorrangig das Unterpulverschweißen eingesetzt wird. Dazu werden Gleichrichter-Schweißmaschinen verwendet. Moderne Schweißmaschinen finden Einsatz beim MSG-Schweißen. Die Durchmesser der drahtförmigen Zusatzwerkstoffe sind beim MSG-Schweißen auf etwa 2,4 mm limitiert. Erkenntnisse zum MSG-Schweißen mit „dickeren“ Drähten sind nur mit Gleichrichtermaschinen in [ERN66] und in [ANN74] gesammelt worden. Aufgrund der hohen Schweißleistungen, die moderne, rechnergesteuerte Schweißmaschinen zur Verfügung stellen, sind Drähte größeren Durchmessers prinzipiell verwendbar, aber bis heute nicht grundlegend untersucht.

## 2.2 Lichtbogen, Kräfte und Werkstoffübergang

Der Lichtbogen wird i. d. R. durch Kurzschluss infolge einer Berührung der Drahtelektrode mit dem Werkstück gezündet. Aufgrund des Drahtdurchmessers und der Geometrie der Drahtspitze ist die Kontaktfläche relativ klein, was eine hohe Stromdichte nach sich zieht. Der hohe Kurzschlussstrom verursacht eine thermische Überlastung der entstandenen Werkstoffbrücke und führt zum Schmelzen sowie zum Verdampfen des Elektrodenendes. Es kommt zu einem Leitungsabriss mit ionisierter Metaldampfstrecke, welche versucht den Stromfluss bei gleichzeitig ansteigendem Spannungspotential wiederaufzubauen. Diese Zündung nennt man Abreißzündung. Danach bilden sich Ladungsträger aus, die eine wichtige Voraussetzung zur Lichtbogensausbildung sind. Der anschließend brennende Lichtbogen ist als eine Art Gasentladung anzusehen. Damit wird eine gezielte Umwandlung der eingesetzten elektrischen Energie in Wärme ermöglicht [MAT12]. Die Erzeugung des Lichtbogenplasmas (elektrisch leitendes Gas) wird als Ionisation bezeichnet.

Die Gasmoleküle dissoziieren durch die hohe Temperatur in Atome. Die Ionisation der Atome erfolgt aufgrund der sogenannten Stoßionisation. Dabei werden Elektronen aus den Atomen durch einfallende und hinreichend schnelle Elektronen herausgeschlagen [SCHE85, MAT02]. In der Gasstrecke entstehen elektrisch negativ geladene freie Elektronen sowie positiv geladene Ionen. Die Elektronen, deren Beweglichkeit 1000mal größer ist als die der Ionen, werden dann in Richtung Anode beschleunigt [SCHE85]. Dort wirken diese wie eine Art „Sandstrahl“ und befreien die Oberfläche von Oxiden. An der Kathode

treten die Elektronen an Stellen aus, an denen die Elektronenaustrittsarbeit am geringsten ist. Diese Stellen sind beispielsweise Bereiche von Oxidschichten. Bei einer bestimmten Stromdichte führt das zur plötzlichen Ausbildung des Kathodenbrennflecks. Aufgrund der thermischen Emission erfolgt der Stromaustritt bevorzugt an Stellen mit der zufällig größten Temperatur, was eine weitere Erhitzung des Bereiches nach sich zieht. Es bildet sich eine theoretische Fläche aus, deren Ausdehnung gegen null und deren Temperatur gegen unendlich strebt. Der hauptsächliche Einfluss auf die wirkliche Fleckgröße dürften der zu übertragende Strom und die Emissionsdichte der Stromträger beim Siedepunkt des Kathodenwerkstoffes sein. Seeliger [MAN56] unterscheidet in drei Lichtbogenarten. Die Temperatur der Anode hat bei der Gasentladung keine grundlegende Bedeutung. Sie spielt aber eine Rolle bei der äußeren Erscheinung des Lichtbogens. Abbildung 2.2-1 zeigt die entstehenden Lichtbogenformen mit steigender Temperatur an der Anode. Eine Temperatur-



- Form 1: Farbe des Bogens entsprechend Kathodenwerkstoff;  
Farbe der Anodenglimmhaut entsprechend Füllgas.  
Form 2: Farbe des Bogens entsprechend Kathodenwerkstoff;  
Glimmhaut im Ionenfleck zusammengezogen, Farbe  
entsprechend Füllgas.  
Form 3: Bogenkern von dem Metaldampf der Anode gefärbt;  
Anode verdampft im Anodenfleck

Abbildung 2.2-1: Lichtbogenformen [MAN56]

erhöhung an der Anode führt dazu, dass der breit gezogene Glimmentladungsansatz zu einer kleineren Ansatzstelle zusammengedrängt wird. Bei Überschreitung der Siedetemperatur des Anodenwerkstoffes kommt es zum zischenden Lichtbogen (Form 3, Abbildung 2.2-1). Im unteren Leistungsbereich bildet sich der Elektronen- und im oberen der Ionenbrennfleck. Dazwischen folgt der Lichtbogen den Gesetzmäßigkeiten der AYRTON'schen Gleichung (Vgl. Kapitel 4). Der Schweißlichtbogen mit abschmelzender Elektrode unterscheidet sich vom physikalischen Lichtbogen dahingehend, dass er an einer stetig zugeführten Elektrode und einem Werkstück brennt, welches i. d. R. eine Relativbewegung zur Elektrode ausführt. Weiterhin wirken sich die Tropfenablösung

und der Werkstofftransport von der Elektrode zum Werkstück durch den Entladungsraum auf die Lichtbogenausbildung aus.

Eine weitere wesentliche Einflussgröße auf die Lichtbogenausbildung ist das verwendete Schutzgas. Zudem besteht die Möglichkeit, den Lichtbogen mit Hilfe der Schweißmaschine (Energie-/Stromquelle) zu beeinflussen.

Für den Werkstoffübergang beim MSG-Schweißen sind unterschiedliche Kräfte verantwortlich. Während des Schweißens wirken innere und äußere Kräfte auf das Drahtelektrodenende und beeinflussen maßgeblich die Art und Weise des Werkstoffüberganges. Im Wesentlichen werden diese Kräfte durch die Art des eingesetzten Lichtbogens und die Eigenschaften der Zusatzwerkstoffe (Elektrode, Schutzgas) bestimmt. Die Lichtbogengesamtkraft setzt sich nach [JEN76] aus folgenden Teilkräften zusammen:

- Elektromagnetische Kräfte
- Pincheffekt
- Elektrodynamische Kräfte
- Plasmastrahlen
- Gaskinetische Kräfte
- Elektrostatische Kräfte
- Druck der Ladungsträger
- Impuls des übergehenden Werkstoffs
- Kräfte durch Verdampfen von Grund- und Zusatzwerkstoff
- Aerodynamische Kräfte
- Kräfte zur Überwindung der Oberflächenspannung des flüssigen Metalls und
- Kräfte durch chemische Reaktionen.

Einen Auszug der im Lichtbogenraum wirkenden Kräfte ist in Abbildung 2.2-2 schematisch dargestellt. Die Wirkung der Schwerkraft in Folge der Erdbeschleunigung hat einen Einfluss auf die Tropfenablösung. Bestimmende Größe für den Betrag der Gewichtskraft ist die Masse des flüssigen Tropfens. Deutlich wird dies bei kurzschlussfreien Werkstoffübergängen, die mit geringer Schweißleistung stattfinden. Dabei bilden sich sehr große Tropfen, welche hauptsächlich durch ihre Masse vom Drahtelektrodenende abgelöst werden [MAT08].

Die Lichtbogenleistung beeinflusst die Wirkung des Plasmastrahls, was sich auf die Einbrandtiefe auswirkt [BAU90]. Hohe Stromdichten führen zu hohen Temperaturen, die eine Expansion der vorhandenen Gase und ein Verdampfen des Metalls am Lichtbogenansatzpunkt nach sich ziehen. In Abhängigkeit des Lichtbogenbrennflecks hat die Wirkung des Dampfdruckes einen Einfluss auf den Tropfenabgang [BOR95].

Die Viskosität des Tropfens sowie die Oberflächenspannung wirken aufgrund

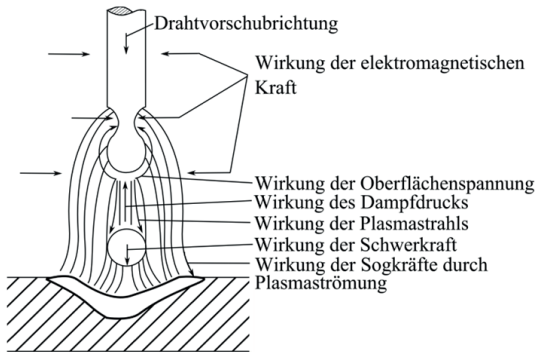


Abbildung 2.2-2: Kräfte im Lichtbogenraum beim MSG-Schweißen [RUC70]

der Benetzung des noch nicht geschmolzenen Drahtelektrodenendes der Tropfenablösung entgegen. Diese nimmt jedoch mit steigender Temperatur ab. Darüber hinaus verdampft während des Prozesses Metall und es entstehen Verdampfungskräfte, die ebenfalls der Tropfenablösung entgegenwirken [WIL06].

Erfolgt der Werkstoffübergang kurzschlussfrei sind neben den unterschiedlich wirkenden Kräften vor allem elektromagnetische und elektrodynamische Vorgänge für die Tropfenablösung verantwortlich. Da der Lichtbogen einen stromdurchflossenen Leiter darstellt, ist dieser von einem Magnetfeld umgeben, welches eine nach innen gerichtete Kraftkomponente (LORENTZ-Kraft) besitzt. Diese Kraft besteht sowohl aus einem axialen als auch einem radialen Anteil und wirkt senkrecht zur Richtung des Stromflusses. Abhängig von der Stromdichte und der daraus resultierenden Einschnürung des Lichtbogens wird durch das konzentrische Magnetfeld bei argonreichen Mischgasen (Ar-Anteil > 75 %) das schmelzflüssige Elektrodenende eingeschnürt und führt zur Tropfenablösung (Pinch-Effekt). Aufgrund des punktförmigen Lichtbogenansatzes bei  $\text{CO}_2$ -haltigen Schutzgasen ist die Kraftwirkung unterhalb des schmelzflüssigen Tropfens und wirkt der Tropfenablösung entgegen (Abbildung 2.2-3). Die Ursache hierfür liegt an der mit zunehmender Temperatur steigenden elektrischen Leitfähigkeit des  $\text{CO}_2$ . Dadurch übernimmt der Lichtbogenkern nahezu den gesamten Stromtransport und schnürt den Lichtbogen ein. Weiterhin unterstützt die endotherm ablaufende Dissoziation des  $\text{CO}_2$  in  $\text{CO} + \text{O}$  an der Anode die Einschnürung [RIE67].

Das elektromagnetische Feld komprimiert die Lichtbogensäule. Dem gegenüber steht der kinetische Druck des hochoverhitzten Plasmas. Im Gleichgewichtszustand stellt sich ein bestimmter Druck mit einem bestimmten Durchmesser in der Leiterachse ein. Da das elektromagnetische Feld von der Strom-

stärke und vom Querschnitt der Lichtbogensäule abhängt, entsteht aufgrund der kegelform des Lichtbogens Druckgradienten. Am Lichtbogenbrennfleck (geringer Querschnitt) ist der Druck höher als am Lichtbogenfuß. Durch den Druckausgleich entsteht eine axiale Plasmaströmung. Aufgrund der Engstelle, die der Lichtbogenansatz darstellt, wirkt die LORENTZ-Kraft, wie in Abbildung 2.2-3 gezeigt, in einem bestimmten Winkel geneigt zur Bogenachse [JEN76].

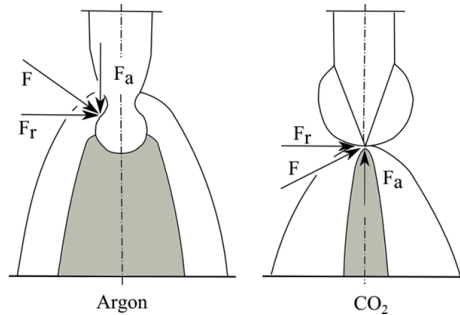


Abbildung 2.2-3: Kraftwirkung auf den Lichtbogen infolge des Magnetfeldes bei unterschiedlichen Schutzgasen [DIL06]

Nach [SCHE85] lässt sich der Werkstoffübergang bei einem kurzschlussfreien Prozess in folgende drei Zeitabschnitte unterteilen: Tropfenbildung an der Elektrode, Tropfenablösung und Flugphase sowie Aufnahme des Tropfens durch das Schmelzbad.

Eine weitere Einteilung des Werkstoffüberganges in seine Arten ist aufgrund der Besonderheiten der Kräftebilanz sinnvoll. Abbildung 2.2-4 gibt einen Überblick der Klassifikation des Werkstoffüberganges.

Zum tropfenförmigen Übergang kommt es im Übergangsbereich zwischen Kurz- und Sprühlichtbogen beim MIG/MAGM-Schweißen (Abbildung 2.2-4 a). Die Schwerkraft verursacht das Herabfallen des Werkstofftropfens.

Dabei haben die meisten Tropfen einen größeren Durchmesser als die Elektrode. Wie oben beschrieben wirkt die Oberflächenspannung der Kraft der Plasmaströmung entgegen. Deshalb ist die Frequenz des Tropfenübergangs sehr niedrig [SCHE85].

Bei hoher Kontraktion der Lichtbogensäule tritt der Rückstoß-Übergang beim MAGC-Schweißen auf (Abbildung 2.2-4 b). Der Lichtbogen wird an der Ansatzstelle durch die hohe Dissoziationsenergie von molekularen Schutzgasen eingeschnürt. Es entsteht ein zentrierter Druck auf das Schmelzbad und den Tropfen. Dadurch wird der Tropfen hochgedrückt und seitlich aus dem Lichtbogenbereich geschleudert [SCHE85].

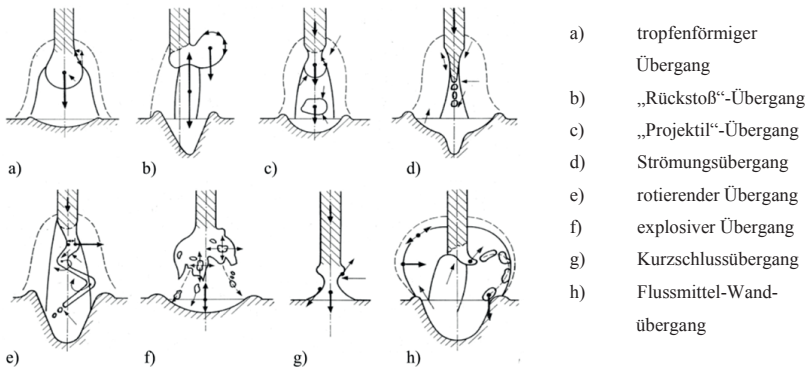


Abbildung 2.2-4: Klassifikation des Werkstoffüberganges [SCHE85]

Die Tropfen lösen sich beim Projekttil-Übergang bevor sie groß genug sind, um durch die Schwerkraft vom Elektrodenende getrennt zu werden. Durch Impulsüberlagerung des Schweißstromes wird im Lichtbogen die Kraftbildung geändert. Das Schutzgas darf nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben, damit die Elektrode ausreichend vom Lichtbogen eingehüllt ist. Mit wachsender Stromstärke steigt der Ansatz des Lichtbogens an der Elektrode hinauf und wird somit länger. Der Draht wird radial von außen nach innen aufgeschmolzen und axial mit Kaltgas umströmt. Wenn die flüssige Säule eingeschnürt wird und die Schmelze axial abströmt, entsteht ein Tropfen. Die Oberflächenspannung stabilisiert diesen und in Form einer gedämpften Schwingung wird der Tropfen schließlich abgelöst. Da der erhöhte Lichtbogendruck nur während der Stromimpulse wirksam ist, bleibt die Einbrandtiefe gering. Zum Projekttil-Übergang kommt es beim MIG- und MAGM-Impulslichtbogenschweißen (Abbildung 2.2-4 c) [SCHE85].

Der Strömungsübergang ist gekennzeichnet durch die Ausbildung einer konzentrischen Elektrodenspitze. Da die Stromstärke dauerhaft auf einem hohen Niveau ist, bildet sich eine trapezförmige auseinanderlaufende Plasmaströmung mit einem ausgeprägten Metaldampfkern. Es entstehen viele kleine Einzeltropfen. Durch hohen Metaldampf- und Plasmadruck entsteht ein flaches fingerförmiges Einbrandprofil, welches dem Sprühlichtbogen beim MIG- und MAGM-Schweißen entspricht (Abbildung 2.2-4 d) [SCHE85].

Wird der Schweißstrom noch weiter erhöht, geht der Werkstoff wie beim Plasma-MIG-Schweißen rotierend ins Schmelzbad über (Abbildung 2.2-4 e). Durch das Anlegen eines starken longitudinalen magnetischen Längsfeldes oder einem benachbarten Lichtbogen mit magnetischem Eigenfeld kann es zum rotierenden Übergang kommen. Die Tropfen werden ähnlich wie beim



Strömungsübergang abgelöst und radial in die Schmelze geschleudert [SCHE85].

Ein explosiver Übergang entsteht bei langer Lichtbogeneinwirkung. Dabei platzen Bereiche des Tropfens und landen als Spritzer neben der Schweißnaht. Dies tritt bei einigen umhüllten Stabelektroden auf (Abbildung 2.2-4 f) [SCHE85].

Beim MAG-Kurzlichtbogen wird der Schweißstrom und demzufolge die Länge des Lichtbogens niedrig gehalten. Da die Elektrode kontinuierlich zur Schweißstelle gefördert wird und die Schweißleistung nicht ausreicht einen Tropfen zu bilden, verkürzt sich der Lichtbogen immer weiter, bis ein Kurzschluss zwischen Elektrode und Werkstück auftritt. Dabei fällt die Spannung auf null ab und die Stromstärke steigt an. Es kommt zum Kurzschlussübergang (Abbildung 2.2-4 g). Das freie Drahtende (Stick-out) wird aufgrund der Widerstandserwärmung erhitzt und erweicht. Der hohe Kurzschlussstrom führt zu einer hohen LORENTZ-Kraft, die das schmelzflüssige Elektrodenende einschnürt und abtrennt. Aufgrund der Induktivität des Stromkreises erfolgt die Zündung des Lichtbogens unter hoher Leistung, was zum Verdampfen des Werkstoffes und zu Spritzern führt [SCHE85]. Moderne Schweißmaschinen begrenzen den Stromanstieg im Kurzschluss oder ziehen die Drahtelektrode mechanisch zurück. Dies führt zu einer Reduzierung der Leistung, was sich in einer Minderung der Spritzerbildung widerspiegelt. Nach dem Kurzschluss fällt die Stromstärke ab und die Lichtbogen Spannung steigt an. Dieser Vorgang erfolgt periodisch (Vgl. Kapitel 2.1.3).

Zum Flussmittel-Wandübergang kommt es beim UP-Schweißen (Abbildung 2.2-4 h). Maßgeblich wird der Werkstoffübergang beim UP-Schweißen von den elektrischen Parametern Schweißstromstärke und Spannung beeinflusst. In [FRA65] wurde der Einfluss der Blaswirkung auf die Lichtbogenausbildung und die daraus resultierende Tropfenablenkung untersucht. Für diese Untersuchung wurden die Massenanschlüsse an verschiedenen Positionen des Werkstückes angebracht (Abbildung 2.2-5). Franz stellte fest, dass der Lichtbogen in Richtung der Pole abgelenkt wird. Die Tropfen werden von den Polen weg ins Schmelzbad beschleunigt. Weithin konnten zwei Werkstoffübergänge ermittelt werden. Einerseits erfolgt der Werkstoffübergang über die Schlacke und andererseits frei. Beim Werkstoffübergang durch die Schlacke geht der schmelzflüssige Tropfen des Zusatzwerkstoffes über die Kaverneninnenwand in das Schmelzbad über. Die Tropfen bilden sich am Drahtende und fallen aufgrund der Schwerkraft in das Schmelzbad. Der Lichtbogenansatz ist vergleichbar mit dem Lichtbogenansatz beim MSG-Schweißen mit reinem  $\text{CO}_2$ . Neben den elektrischen Parametern sind weitere Einflussfaktoren auf die Tropfenablösung die Pulverzusammensetzung, der Drahtdurchmesser sowie die Drahtelektrodengeometrie.

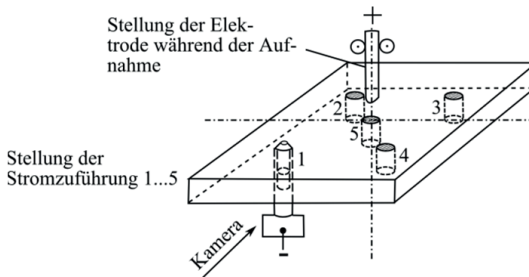


Abbildung 2.2-5: Anordnung der Stromzuführung in der Versuchsplatte beim UP-Schweißen zur Ermittlung der Blaswirkung [FRA65]

Die Schweißpulver lassen sich nach ihrem Verhältnis von metallurgisch-basisch und sauer wirkenden Schlackenkomponenten unterteilen [KIL91]. Bei neutralen und basischen Pulvern kann eine Tropfenablösung anhand des Verlaufes der Stromstärke und Spannung erkannt werden. So gehen in 85 bis 97 % die Tropfen in relativ regelmäßigen Abständen bei Stromspitzen über. Engel [ENG73] erkannte, dass die zeitlichen Schwankungen der Stromstärke, Schmelzbadbewegung und Kavernenbewegung einen Zyklus mit zwei Phasen zeigen. Bei steigender Stromstärke vergrößert sich die Kaverne durch die Entstehung und Ausdehnung von Gasen bis diese ein Maximum erreicht. Danach löst sich der annähernd runde Tropfen ohne längere Verweilzeit von der Elektroden spitze [ENG72]. Die Kaverne bricht zusammen und die Stromstärke sinkt. Aus den Momentanwerten des  $U/I$ -Verlaufes kann somit auch eine Prozessanalyse erfolgen, ohne durch einen Versuchsaufbau den natürlichen Ablauf des UP-Schweißens zu stören. Diese Analyse der elektrischen Größen wird in [DOR85, DOR85.1] dazu genutzt, das statische und dynamische Verhalten von Schweißmaschinen zu untersuchen. Die Tropfenablösefrequenz nimmt bei neutralen Pulvern gegenüber basischen zu [ENG72]. Dagegen entstehen bei hochbasischen Pulvern sehr große Tropfen, die häufig Kontakt mit der vorderen Kavernenwand haben. Teilweise ergeben sich Werkstoffbrücken zwischen Drahtende und Schmelzbad, was dazu führt, dass höhere Schmelzbadbewegungen auftreten als bei Verwendung basischer oder neutraler Pulver [EIC75]. Zum einen trägt die Viskosität der schmelzflüssigen Schlacke zur Prozessstabilität bei. Die Viskosität der Schlacken ist temperaturabhängig [EIC77]. Abbildung 2.2-6 zeigt dazu die Viskosität unterschiedlicher Schweißpulver im Temperaturbereich zwischen 1300...1500 °C.

Durch die Untersuchungen von [FEL78, ENG72, FRA65, TYP54] konnte ein Pulsieren der Kaverne festgestellt werden. Bei zähen Schlacken (basische Pulver) bläht sich die Kaverne mehr auf als bei niedrig viskosen Schlacken, was

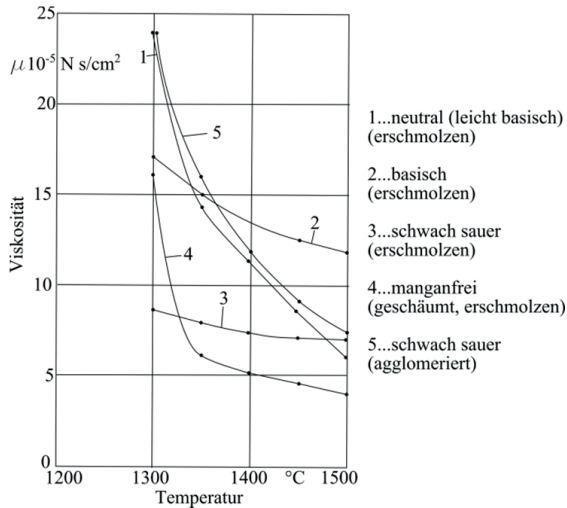


Abbildung 2.2-6: Viskosität verschiedener Schweißpulverschmelzen abhängig von der Temperatur [EIC77]

zum Aufplatzen der Kaverne sowie zum Erlöschen des Lichtbogens führen und letztendlich Prozessinstabilitäten erzeugen kann. Das Pulsieren, die Entgasung der Kaverne und die Kavernengröße sind von der Pulverzusammensetzung abhängig. Die Pulsationsfrequenz ist bei größeren Kavernen geringer, d. h. verlangsamer Rhythmus von Entstehen und Zusammenfallen der Gaskaverne [TYP54]. Zum anderen spielt der Nebenstromschluss über die Schlacke eine Rolle. Das aufgeschmolzene Pulver, welches aus Mehrstoffsystemen besteht, hat je nach Temperatur und Zusammensetzung einen spezifischen elektrischen Widerstand. Bestandteile wie  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  sowie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  senken und  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaF}_2$ , Alkali- sowie Erdalkalioxide erhöhen die Leitfähigkeit [FRA68]. Der prozentuale Anteil des Schlackenstromes beläuft sich laut [FEL77] auf etwa 10 bis 15 % des gesamten Schweißstromes. Die Ergebnisse in [EIC75] zeigen, dass der über die Schlacke fließende Strom zur Verdampfung des Pulvers und zur leichteren Ionisierbarkeit des Lichtbogenraumes führt.

Bei der Verwendung von Wechselstrom entstehen Tropfen, deren Volumen zwischen denen von positiv und negativ gepolten Elektroden bei Gleichstromschweißungen liegen. Die Tropfenbewegung ist dabei unregelmäßig [EIC78, EIC76]. Eigene Untersuchungen zeigten, dass die Tropfen, die sich vom freien Ende der Elektrode lösen, sowohl direkt in das Schmelzbad als auch indirekt über die Schlackenwand der aufgeblähten Kaverne übergehen. Der Werkstoffübergang über die Kavernenwand nimmt bei Wechsel-

stromschweißungen mit steigender Spannung zu, wenn auch nicht so signifikant wie bei Gleichstromschweißungen. Des Weiteren steigt die Tropfenablösefrequenz. Im Mittel sind die Tropfenablösefrequenzen höher. Verursacht wird diese Erhöhung durch die schwellende LORENTZ-Kraft infolge des Wechselstromes. Die Tropfengröße nimmt bei steigender Spannung ab. Deutlich feintropfiger erfolgt der Werkstoffübergang bei Verwendung von Wechsel gegenüber Gleichstrom.

[LES58.2] untersuchte den Werkstoffübergang beim MIG-Schweißen mit Drahtelektroden bis 2,4 mm Durchmesser. Es wurde drei Lichtbogenarten festgestellt. Diese sind der Lang-, Sprüh- und rotierende Lichtbogen. Der Autor merkt an, dass die Lichtbogenart abhängig von Schweißstromstärke, Polarität, Drahtdurchmesser, chemischer Zusammensetzung und vom freien Drahtende ist. Um einen spritzfreien Prozess mit maximaler Abschmelzleistung zu erreichen, wird empfohlen kurze freie Drahtlängen und große Drahtdurchmesser zu verwenden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das UP-Schweißen weitgehend erforscht ist. Die Möglichkeit der Einflussnahme durch geregelte Schweißmaschinen auf den Werkstoffübergang ist begrenzt und erfolgt i. d. R. durch die Kavernenatmosphäre (chemische Zusammensetzung des Schweißpulvers) sowie die Schweißleistung, sodass sich ein „natürlicher“ Lichtbogen einstellt. Somit sind die Grenzen der erreichbaren Abschmelzleistungen und der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bekannt. Die Quellen belegen, dass das UP-Schweißen eine höhere Wirtschaftlichkeit aufweist als das MSG-Schweißen. Mit stufengeschalteten Schweißmaschinen stellt sich beim MSG-Schweißen je nach eingesetztem Schutzgas und Schweißleistung eine bestimmte Lichtbogenart (siehe Abbildung 2.1.3-1) ein. Diese kann im Gegensatz zum UP-Schweißen mit Hilfe von geregelten Schweißmaschinen beeinflusst werden (modifizierter Kurz-, - Sprüh-, Impulslichtbogen). Aus dem Stand der Technik geht weiterhin hervor, dass die Zusammenhänge zwischen Werkstoffübergang und von der Schweißmaschine bereitgestellten Strom sowie Spannung beim MSG-Schweißen mit Drahtdurchmesser bis 2,4 mm bekannt sind. Für das MSG-Dickdraht-Verfahren mit geregelten Schweißmaschinen liegen nur wenige bzw. keine Erkenntnisse vor. Um die in der Einleitung aufgestellte These (Drahtdurchmesser kann beliebig erhöht werden, nur abhängig von bereitgestellter Schweißleistung) zu beweisen, sind zur Analyse dieses Lichtbogenverfahrens eigene Untersuchungen notwendig. Denn es ist davon auszugehen, dass sich die bisher bekannten Bedingungen zur Tropfenablösung mit der Zunahme des Drahtdurchmessers ändern. In wie weit sich die Werkstoffübergänge von den im Stand der Technik beschriebenen Verfahren übertragen lassen, müssen die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen.

### 3 Zielstellung der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll ein Fundament für den Einsatz der MSG-Dickdrahttechnik zum Verbindungsschweißen in der stahlverarbeitenden Industrie geschaffen werden. Als Anwendungsfall steht das mechanisierte Schweißen von langen Nähten an stahlbautypischen Bauteilen im Vordergrund. Zur Durchdringung der komplexen Thematik sind grundlagenorientierte Untersuchungen notwendig, um den Prozess des MSG-Dickdraht-Schweißens gesamtheitlich zu verstehen. Die Untersuchungen dienen zur Erweiterung der MSG-Verfahrensvarianten um ein Hochleistungsschweißverfahren bei dem moderne Hochstrom-Schweißgleichrichter ( $I = 1500 \text{ A}$  bei  $ED = 100 \%$ ) Einsatz finden.

Im Einzelnen werden folgende Ziele angestrebt:

#### Bewertung von Prozessbedingungen

Ermittelt werden die Zusammenhänge zwischen Abschmelz-, Schweißleistung und Einbrandgeometrie. Insbesondere sind Lichtbogen und Werkstoffübergang von Interesse, da eine schweißleistungsabhängige Zuordnung der sich einstellenden Lichtbogenarten erfolgen soll. Dazu ist es unumgänglich die physikalischen Größen, die den Lichtbogen in seiner Art beeinflussen, herauszustellen. Deshalb sind wesentliche Untersuchungsschwerpunkte die Schweißmaschinencharakteristik, die elektrischen Parameter Stromstärke und Spannung sowie der Parameter Drahtvorschub, welche zu variieren und aufeinander abzustimmen sind. Im Ergebnis sollen Grenzen des Verfahrens in Hinsicht auf Schweißleistung und -geschwindigkeit gefunden werden. Um ein prozesssicheres Schweißen zu ermöglichen und eine fehlerfreie Schweißverbindung zu erzeugen, werden die Schutzgaszusammensetzung, der Brennerabstand und die -stellung optimiert.

#### Ermittlung wirtschaftlicher Verfahrenskennzahlen und der Schweißnahtgeometrie

Sind die Prozessbedingungen erforscht, kann an stahlbautypischen Schweißverbindungen die umsetzbare Abschmelzleistung, die Schweißgeschwindigkeit und die notwendige Lagenanzahl ermittelt werden. Es ist zu erwarten, dass der MSG-Dickdraht-Prozess gegenüber den bekannten MSG- und UP-Schweißen eine angepasste Fugengeometrie benötigt, sodass die Einflüsse der Nahtvorbereitung, wie Nahtart, -öffnungswinkel und Fugentiefe auf das Schweißergebnis herausgestellt werden müssen, um dem Anwender eine optimale Fugenvorbereitung empfehlen zu können.

### Evaluation der Schweißnahtgüte

Zur Verwendung des MSG-Dickdraht-Verfahrens bei Schweißkonstruktionen kann eine ausschließliche Betrachtung des Lichtbogens und der prozessrelevanten Parameter ohne Berücksichtigung der erzeugten Schweißnaht nicht erfolgen. Als Kriterien für die Qualität der erzeugten Schweißnähte werden mechanische Festigkeitskennwerte, wie Zugfestigkeit und Kerbschlagarbeit, herangezogen. Zielgröße ist mindestens das Erreichen der Werte von konventionell geschweißten Verbindungen. Weiterhin sollen die Schweißnähte frei von inneren und äußeren Schweißnahtunregelmäßigkeiten sein. Dies wird durch zerstörungsfreie Prüfungen, wie Farbeindringprüfung und Durchstrahlungsprüfung, nachgewiesen.

Der Autor stellt sich das Ziel, durch eigene experimentelle Untersuchungen und dem schöpferischen Verarbeiten von wissenschaftlichen Erkenntnissen, einen Beitrag zum Verständnis des MSG-Dickdraht-Prozesses zu leisten.

## 4 Modellbetrachtung zum Lichtbogen-Schweißen

### 4.1 Ausgangssituation

Das Lichtbogenschweißen zeichnet sich dadurch aus, dass durch die zugeführte Wärmeenergie sowohl der Zusatz- als auch der Grundwerkstoff bis weit über ihre Schmelztemperaturen erwärmt werden. Es bildet sich eine gemeinsame Schmelze, die anschließend zur Schweißnaht erstarrt. Dabei bestimmen metallurgische Vorgänge maßgeblich die mechanisch-technologischen Eigenschaften und die Qualität der Verbindung. Die eingesetzte Energie beim Lichtbogenschweißen wird nicht nur zum Ändern des Aggregatzustandes (fest - flüssig - fest) der Werkstoffe umgesetzt, sondern auch in anderen Prozessen die nicht für das Schmelzen genutzt werden. Eine getrennte Betrachtung der Energieanteile ist nicht zielführend, da die Prozesse energetisch gekoppelt sind. Deshalb ist die gesamte Wärmebilanz des Lichtbogenprozesses von grundlegender Bedeutung, um Schwachstellen aufzudecken und eigenen Untersuchungen abzuleiten.

### 4.2 Physik und Wirkung des Lichtbogens auf Elektrode sowie Schmelzbad

Im Lichtbogen fließt ein elektrischer Strom. Dieser ist als eine im Raum bewegte Ladung  $Q$  definiert und berechnet sich aus dem Quotienten von  $dQ$  und  $dz$ . Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem elektrischen und einem magnetischen Feld umgeben. Wird eine Ladung  $Q$  in einem beliebigen inhomogenen elektrischen Feld entlang eines Weges  $\vec{s}$  vom Punkt X zum Punkt Y bewegt, so wirkt längs eine Kraft  $\vec{F}$ .

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (3)$$

Durch die Einführung einer normierten Kraft erhält man die elektrische Feldstärke  $\vec{E}$ . Die verrichtete Arbeit  $W$  entlang der Wegstrecke berechnet sich aus Gleichung (4).

$$W_{XY} = Q \cdot \int_X^Y \vec{E} d\vec{s} \quad (4)$$

Da die zu verrichtende Arbeit von der Ladung  $Q$  abhängig ist, wird die elektrische Spannung als unabhängige Größe wie folgt bezeichnet.

$$U_{XY} = \frac{W_{XY}}{Q} = \int_X^Y \vec{E} d\vec{s} \quad (5)$$

Der gesamte elektrische Strom  $I$ , der durch eine eingeschlossene Fläche fließt, erzeugt eine magnetische Feldstärke  $\vec{H}$ , die sich aus dem Linienintegral einer längs geschlossenen Umlauflinie des Leiters ergibt.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \oint \vec{H} d\vec{s} \quad (6)$$

Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  berechnet sich wie folgt. Dabei ist  $\mu_1$  die magnetische Permeabilität, welche die Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder bestimmt.

$$\vec{B} = \vec{H} \cdot \mu_1 \quad (7)$$

Das Lichtbogenplasma besteht aus Stromfäden, die sich zwischen Kathode und Anode bilden. Die beschleunigten Teilchen haben keine bevorzugte Richtung. Das Magnetfeld  $B$  kann die Stromfäden (Plasma) einsperren, wenn die LORENTZ-Kraft (Vgl. Kapitel 2.2), die auf die Ionen wirkt größer ist als der Druckgradient, der die Teilchen nach außen treibt. Hohe elektrische Ströme führen zu magnetischen Feldstärken, die eine Wechselwirkung zwischen benachbarten Stromfäden hervorrufen und zur Einschnürung des Lichtbogens führen.

Betrachtet man den Lichtbogen als Werkzeug zur Erzeugung einer Schweißnaht ergeben sich die in Abbildung 4.2-1 aufgeführten Zusammenhänge zwischen der im Mittelpunkt stehenden Schweißnaht, dem Lichtbogen, der Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff.

Der Lichtbogen lässt sich nach [SCH85] in fünf Quellengebiete unterteilen. Diese sind gegliedert in Energiequellen- (Elektrode und Schmelzbad) und Energiesenkengebiete (abfließende Wärme in die Elektrode, Schmelze und Umgebung). In den jeweiligen Teilbereichen werden unterschiedliche Leistungen umgesetzt. Abhängig ist dies von den direkt auf den Lichtbogen einflussnehmenden Größen wie der Lichtbogenatmosphäre, den elektrischen Parametern und der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Werkstoffe (Vgl.



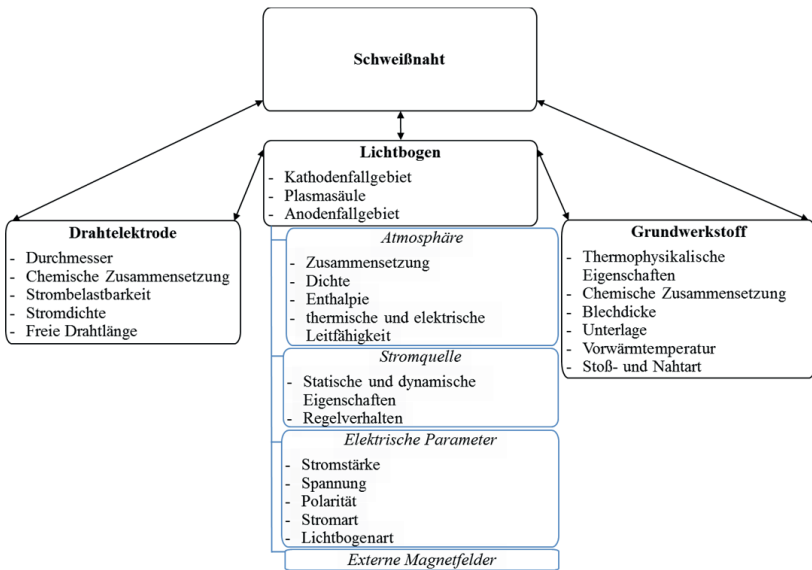


Abbildung 4.2-1: Zusammenhang zwischen Schweißnaht, Lichtbogen, Drahtelektrode sowie Grundwerkstoff und deren Einflussfaktoren

Abbildung 4.2-1). Abbildung 4.2-2 zeigt die Spannungsabfälle der Quellengebiete. In der Lichtbogensäule ist der Spannungsabfall wesentlich geringer als im Anoden- und Kathodenfallgebiet. Die aus der Kathode emittierten Elektronen werden im Lichtbogen in Richtung Anode beschleunigt. Dabei werden weitere Elektronen durch Stoßionisation aus den Molekülen und Atomen, die sich in der Lichtbogenatmosphäre befinden, herausgelöst und ebenfalls zur Anode beschleunigt (Kapitel 2.2). Es entsteht eine Elektronenwolke. Diese wird als Anodenfallgebiet bezeichnet und erzeugt einen Potenzialsprung ( $U_A$  in Abbildung 4.2-2). Die kinetische Energie der Elektronen wird an der Anode in Wärme umgewandelt. Die durch Stoßionisation entstanden Ionen sorgen im Kathodenfallgebiet (Wolke aus Ionen an der Kathode) für einen Potenzialsprung ( $U_K$  in Abbildung 4.2-2) und eine thermische Reaktion infolge der Rekombination.

Ein Lichtbogen kann nur auf einer definierten Lichtbogenkennlinie existieren. Diese ist durch zwei wesentliche Bereiche gekennzeichnet. Die Kennlinie hat bei geringen Stromstärken einen fallenden Verlauf. So sinkt die Lichtbogen-spannung durch Erhöhung der Stromstärke. Die Stromdichte und die Temperatur steigen, sodass der Ionisationsgrad des Lichtbogens erhöht wird. Infolgedessen vergrößert sich die elektrische Leitfähigkeit des Lichtbogenplasmas

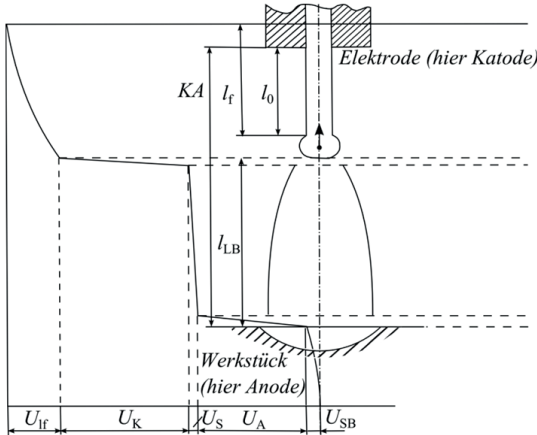


Abbildung 4.2-2: Quellengebiete am Lichtbogen mit zugehörigen Spannungsabfällen [SCH85]

überproportional. Am Sättigungspunkt, d. h. die mögliche Ionisation des Plasmas ist ausgeschöpft, nimmt die elektrische Leitfähigkeit weniger stark zu und erreicht ein Maximum. Dabei fällt die Lichtbogenspannung auf einen minimalen Wert ab. Der Bereich geringer Stromstärken kann mit der empirisch ermittelten AYRTON'schen Gleichung (8) berechnet werden:

$$U_L = C_1 + C_1 I_L + \frac{C_3 + C_4 I_L}{I} \quad (8)$$

Für verschiedene Lichtbogenprozesse sind die Konstanten  $C_1 \dots C_4$  mehrfach ermittelt worden, unterscheiden sich aber erheblich [THU08]. Bei einer weiteren Erhöhung der Stromstärke nehmen sowohl Stromdichte als auch die Temperatur zu. Der Ionisationsgrad und die elektrische Leitfähigkeit aber nicht. Die Gasteilchen stoßen aufgrund der thermisch angeregten Eigenbewegung zusammen. Dadurch wird der Ladungstransport behindert und der Widerstand in der stromleitenden Strecke steigt. Deshalb ist eine größere Lichtbogenspannung notwendig, um den Strom zu übertragen. Aus diesem Grund hat die Kennlinie hier einen nahezu linear steigenden Verlauf. Es gilt das OHM'sche Gesetz. D. h. bei Vergrößerung der Lichtbogenlänge nimmt die Säulenspannung aufgrund der Aufrechterhaltung des Stromflusses zu. I. d. R. arbeiten die Lichtbogenschweißverfahren in diesem Bereich. In Abbildung 4.2-3 ist für eine konstante Lichtbogenlänge bei einer bestimmten Atmosphäre die Lichtbogenkennlinie schematisch dargestellt.

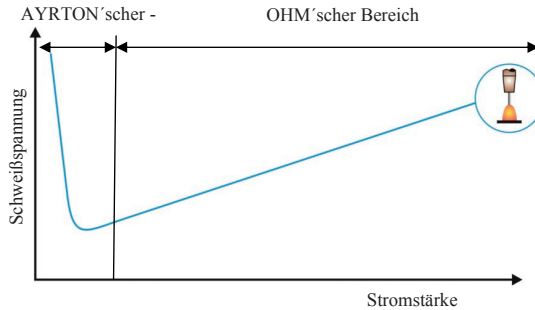


Abbildung 4.2-3: Schematische Darstellung einer Lichtbogenkennlinie bei konstanter Lichtbogenlänge und definiertem Lichtbogenmedium

Die Lichtbogenleistung ist stark vereinfacht als Summe der benötigten Leistungen zum Schmelzen des Drahtes  $P_1$  (Gleichung (9)) und der Ionisation des Lichtbogens  $P_2$  (Gleichung (10)) überschlagbar. Bei der Berechnung werden Verluste nicht berücksichtigt.  $P_1$  lässt sich vereinfacht als Produkt aus Massenstrom der Drahtelektroden, der spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturänderung bis zum Schmelzen des Drahtes addiert mit dem Produkt aus Schmelzenthalpie  $H_{fus}$  und Abschmelzleistung berechnen.

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \cdot d_d^2 \cdot v_d \cdot \varphi_d \cdot c_d \cdot \Delta T + H_{fus} \cdot MR \quad (9)$$

Zur Lichtbogenionisation beim MSG-Schweißen muss nicht der komplette Gasvolumenstrom, sondern nur der im Kegelstumpf des Lichtbogens befindliche Gasvolumenzylinder ionisiert werden. Die Leistung berechnet sich dabei aus dem Verhältnis der molaren Masse zu Gasvolumenstrom multipliziert mit der Gasdichte, der AVAGADRO-Konstanten und der Ionisationsenergie.

$$P_2 = \frac{\dot{V}_{LB}}{M_G} \cdot \varphi_G \cdot N_A \cdot E_{ion} \quad (10)$$

Die oben gezeigte Berechnungsmethode kann nur als Annäherung genutzt werden, da beispielsweise die spezifische Wärmekapazität  $c_d$  temperaturabhängig ist und ein nicht unerheblicher Teil der Energie des Lichtbogens an die Umgebung durch Wärmestrahlung, -leitung sowie Konvektion abgegeben wird und als Verlust angesehen werden kann. Die „Verlust“-Energienmenge ist von vielen Größen, wie z. B. Lichtbogenverfahren, -länge, -leistung, Stromart, -form, Kontaktrahabstand, Schutzgas oder Pulverzusammensetzung, Elektrode u.v.m. abhängig. Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad des Verfahrens, der das

Verhältnis der Wärmeenergie zum Schmelzen und Übertragen des Metalls zur Gesamtenergiemenge darstellt [CON59].

Ein Spannungsabfall tritt beim Stromübergang von der Kontaktdüse auf die Elektrode auf. Dieser und die Widerstandserwärmung des Drahtes, welche abhängig von Querschnitt, dem spezifischen Widerstand der Elektrode sowie der Länge des freien Drahtendes und der Höhe der Kontaktdüsentemperatur ist, führen zu einer Wärmeentwicklung. Ein Teil der Wärmemenge erhitzt den Draht und erleichtert das Abschmelzen im Lichtbogen. Anteile, die in Form von Strahlung an die Umgebung als auch an den Schweißbrenner abgegeben und über die Kühlung abgeführt werden, sind für den Prozess nicht nutzbar. Die Spannung im Lichtbogen wird um den Betrag der Spannungsabfälle an der Kontaktdüse und im freien Drahtende reduziert. Des Weiteren erfolgt eine Umwandlung der Energie, die durch die Reibung zwischen der kontinuierlich zur Schweißstelle geförderten Drahtelektrode und der Kontaktdüse hervorgerufen wird, in Wärme, welche aber vernachlässigbar klein ist.

Der Zusatzwerkstoff wird direkt sowie indirekt durch die Wärmeleitung und Strahlung des Lichtbogens geschmolzen und bis weit über Schmelztemperatur erwärmt [HÄL14]. Die Oberflächentemperatur des Tropfens ist dabei wesentlich höher als die im inneren. Bei der Bewegung des Tropfens durch das Lichtbogenplasma in Richtung Schmelzbad wird der Tropfen weiter erhitzt. Die gespeicherte Wärmemenge wird über das Schmelzbad in den Grundwerkstoff eingebracht.

Der auf die Oberfläche gerichtete Wärmestrom des Lichtbogens und die Widerstandserwärmung führen zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes. Der Einfluss des schmelzflüssigen Tropfens auf die Formung der inneren Schweißnahtgeometrie ist geringer als die, welche durch die Wirkung des Lichtbogens (Plasmadruck) hervorgerufen wird. Im Wesentlichen wird mit dem abgeschmolzenen Zusatzwerkstoff die äußere Schweißnahtgeometrie (z. B. Nahtüberhöhung, -breite) und die Schweißgutzusammensetzung eingestellt. Die in den Grundwerkstoff eingebrachte Wärmeenergie fließt durch Wärmeleitung ins Bauteil sowie durch Wärmeübergang über die Oberfläche des Werkstückes in die angrenzenden Medien (Umgebung, Spannmittel usw.).

### 4.3 Schlussfolgerungen

Theoretisch kann eine abschmelzende Elektrode mit einem beliebig großen Durchmesser mit Hilfe eines Lichtbogens stirnseitig geschmolzen werden. Voraussetzung ist eine entsprechende Energiequelle mit genügend Leistung. Für die Erzeugung qualitätsgerechter Schweißverbindungen sind aber die physikalischen und technologischen Einflussfaktoren zu beachten (Abbildung 4.3-1), sodass der Steigerung des Elektrodendurchmessers Grenzen gesetzt sind.

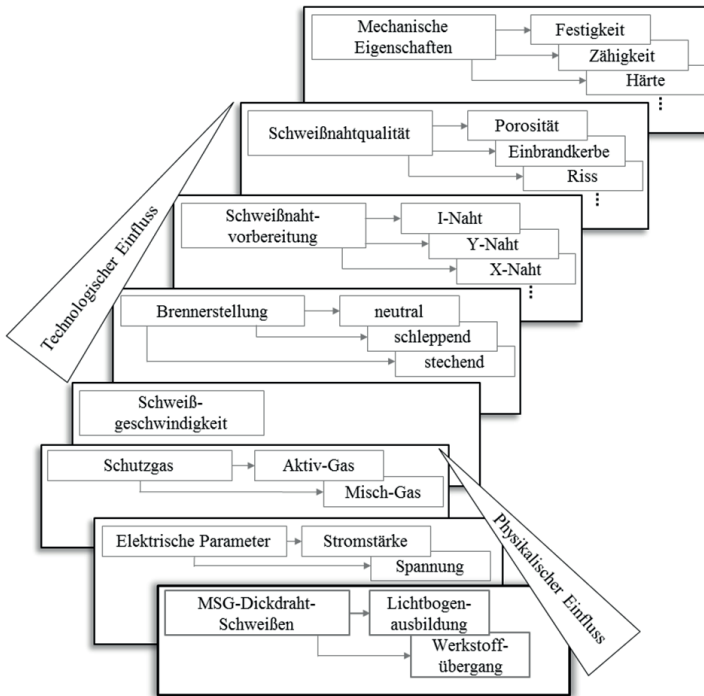


Abbildung 4.3-1: Physikalische - und technologische Einflussfaktoren beim MSG-Dickdraht-Schweißen

Grundlegende Untersuchungen zur Skalierung der Elektroden beim MSG-Schweißen mit elektronischen Schweißmaschinen wurden bisher noch nicht durchgeführt. Vom MSG-Schweißen mit Drahtelektroden bis 2,4 mm Durchmesser ist bekannt, dass sich je nach Schweißleistung (Produkt aus Stromstärke und Spannung) bestimmte Lichtbogenarten einstellen (Vgl. Kapitel 2.1.3). Es ist zu erwarten, dass sich beim MSG-Dickdraht-Schweißen ( $\varnothing > 2,4 \text{ mm}$ ) die verschiedenen Lichtbogenbereiche (siehe Abbildung 2.1.3-1) zu höheren Spannungen und Stromstärken verschieben. Im Kurzlichtbogenbereich ist davon auszugehen, dass wesentlich höheren Kurzschlussströme auftreten, die von der Schweißmaschine sowohl zeitlich als auch in ihrer Höhe begrenzt werden müssen, um die Spritzerbildung bei der Auflösung der Kurzschlussbrücke zu reduzieren. Der Sprühlichtbogen beim MSG-Dickdraht-Schweißen erzeugt vermutlich große Schmelzbadlängen und -bewegungen, die Poren im Schweißgut begünstigen. Weiterhin liegt die Annahme nahe, dass durch die großen Stromstärken und elektromagnetischen Felder, die einen hohen Plasmadruck auf-

grund der Kontraktion des Lichtbogens nach sich ziehen, sowohl der Prozess als auch die Dynamik des Schmelzbades unbeherrschbar werden. Bislang liegen keine Erkenntnisse für das MSG-Dickdraht-Schweißen über die Übertragung bzw. Existenz der Lichtbogenarten vor.

Die Abschmelzleistungen von Standard-Drahtelektroden ( $\varnothing < 1,6 \text{ mm}$ ) sind aufgrund der Strombelastbarkeit (Erweichen des Drahtes infolge Widerstandserwärmung) der Drähte und der Beherrschbarkeit des Prozesses begrenzt. In der Praxis werden heute prozesssicher im Sprühlichtbogen maximale Drahtvorschubgeschwindigkeiten von bis zu  $12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $I = 335 \text{ A}$ ,  $U = 35 \text{ V}$ ) beim MSG-Schweißen mit  $1,2 \text{ mm}$  G3Si1-Elektroden (Schutzgas M21) erreicht. Das entspricht nach Gleichung (9) einer Leistung für das Schmelzen des Drahtes von  $P_1 \approx 2,7 \text{ kW}$ . Beim UP-Schweißen wird die Faustformel für die maximale Strombelastung von 200-mal Drahtdurchmesser in Ampere verwendet. Wobei in [ANN74] darüber berichtet wurde, dass Drahtelektroden mit weitaus höheren Stromstärken belastet werden können. Ohne Berücksichtigung der erzeugten Schweißverbindung kann  $P_1$  durch Vergrößerung des Drahtdurchmessers  $d_d$  beliebig gesteigert werden. Infolge einer höheren Lichtbogenleistung steigen der Lichtbogensdruck [THU08] sowie die elektrische und magnetische Feldstärke. Da Einschweißtiefe, Schmelzbaddynamik und Schweißnahtgeometrie davon abhängen, ist eine ausschließliche Betrachtung der Lichtbogenleistung nicht ausreichend, um eine Obergrenze der Lichtbogenleistung für eine qualitätsgerechte Schweißverbindung festzulegen.

Die Verbindungseigenschaften werden einerseits durch die Wärmeeinflusszone (WEZ) bestimmt. Abhängig von der Streckenenergie (Gleichung (11)) stellen

$$E = \frac{I_s \cdot U_s}{v_s} \quad (11)$$

sich je nach verwendetem Werkstoff unterschiedliche Gefüge in der WEZ ein. Geringe Streckenenergien führen zu hohen Abkühlgeschwindigkeiten, die ein hartes, grobkörniges Gefüge erzeugen. Eine langsame Abkühlung, die durch eine hohe Streckenenergie erzeugt wird, können Zähigkeitsverluste nach sich ziehen. Andererseits bestimmt die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes die Qualität der Fugestelle. Das Schweißgut, hat zur Gewährleistung anforderungsgerechter Verbindungen i. d. R. eine höhere Reinheit als der Grundwerkstoff. Aufgrund der zu erwartenden großen Schmelzbäder beim MSG-Dickdraht-Schweißen ist davon auszugehen, dass der Aufmischungsgrad (Verhältnis zwischen geschmolzenem Grund- und Zusatzwerkstoff) hoch ist. Weiterhin hängt mit der Schweißleistung das Zu-/Abbrand-Verhalten von Legierungselementen im Schweißgut zusammen. Dadurch wird die Legierung des Schweißgutes geändert, was wiederum die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindung beeinflusst.

Aufgrund der Vielzahl der Stellgrößen (siehe Abbildung 4.2-1), insbesondere solche, die durch die Schweißmaschine (Stromquellen-Charakteristik, Neigung der Kennlinie, Regeldynamik, Begrenzung der Stromstärke bzw. Spannung, Zeiten für Stromanstieg/-abfall usw.) auf den Lichtbogen wirken und durch die komplexen Zusammenhänge zwischen Schweißnaht, Lichtbogen, Drahtelektrode sowie Grundwerkstoff führen letztendlich empirisch ermittelte Schweißdaten iterativ zu den Prozessgrenzen und den erreichbaren mechanisch-technologischen Gütewerten.

## 5 MSG-Dickdraht-Schweißen – technisches Equipment und Prozessgestaltung

### 5.1 Versuchswerkstoffe

Das MSG-Dickdraht-Schweißen ist ein Hochleistungsschweißverfahren ( $MR > 8 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ), welches auf Anwendungen im Stahlbau abzielt. Deshalb wurden für die Versuche Bleche der Güte S355J2+N in Dicken von 12, 15 und 20 mm gewählt. Als Schutzgas wurden  $\text{CO}_2$ , Ar und deren Gemische verwendet. Die Drahtelektroden entsprachen der Güte G3Si1 mit den Durchmessern 3,2 und 4,0 mm.

### 5.2 Versuchsaufbau und Auswerteverfahren

Die verwendete Schweißmaschine besitzt ein sekundär getaktetes Leistungsteil und liefert eine stufenlos einstellbare Stromstärke im Bereich von  $I_s = 50 \dots 1500 \text{ A}$  bei einer Spannung von  $U_s = 20 \dots 46 \text{ V}$ . Die Höchstwerte werden bei 100 % Einschaltdauer bereitgestellt und erbringen dabei eine Dauerleistung von 69 kVA. Über das Prinzip der virtuellen Maschine lässt sich durch ein Statikmodul ein beliebiger Innenwiderstand und mit dem Dynamikmodul eine synthetische Drossel abbilden (vgl. Abbildung 5.2-1). Durch das Steuerungsmodul, mit dem sich synthetische Generatorcharakteristiken erzeugen lassen, werden Innenwiderstand und Drossel verlustfrei dargestellt. Zudem ist es möglich, durch eine differenzierbare Drosselwirkung jeweils separat auf den Stroman- und -abstieg Einfluss zu nehmen. Weiterhin bietet die Strom-

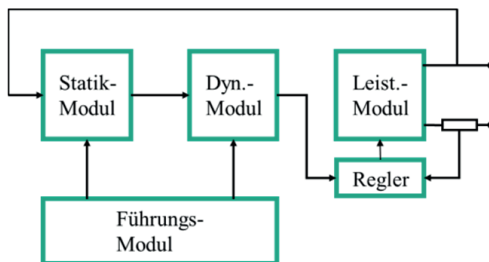


Abbildung 5.2-1: Prinzip der virtuellen Maschine



quelle die digitale Wahloption zwischen Konstant-Spannung (CV) und Konstant-Strom (CC) als Quellencharakteristik. Die Einstellgrößen zur Leistungsvoreinstellung sind die Drahtvorschubgeschwindigkeit sowie die Spannung bei CV-Kennlinie und die Stromstärke bei CC-Kennlinie.

Die technologischen Untersuchungen gliedern sich in zwei Schwerpunkte: Zum einen in die Analyse der Lichtbogensausbildung sowie dem Werkstoffübergang und zum anderen in die Bewertung der Schweißnahtqualität. Bei den Schweißversuchen wurde zur Feststellung der Einflüsse immer nur ein Parameter geändert und dessen Auswirkung untersucht. Das bedeutet, dass sich bei der Verwendung der CV-Kennlinie für eine Drahtvorschubgeschwindigkeit die Lichtbogenlänge über die Spannung und bei Verwendung der CC-Kennlinie über die Stromstärke einstellen lässt.

Beobachtungen des Lichtbogens wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera realisiert. Abbildung 5.2-2 zeigt den Versuchsstand. Der wassergekühlte Hochleistungs-MAG-Brenner ist ortsfest am Balkenfahrwerk angeordnet. Geschweißt wurde auf einem rohrförmigen Werkstück, welches auf Rollenböcken angetrieben die Schweißbewegung ausführt. Damit war sichergestellt, dass sich der Werkstoffübergang immer im Fokuspunkt der Kamera befindet. Aufgrund der sehr tief im Blech brennenden Lichtbögen erfolgte die Beobachtung des Schweißprozesses von oben, 20° zur Horizontalen geneigt (vgl. Abbildung 5.2-2). Bei der Bildaufnahme kam die Kamera Phantom v310 der Firma Vision Research Inc. zum Einsatz, die bei höchster Auflösung von 1280 x 800 eine maximale Bildrate von 3250 Bildern pro Sekunde ermöglicht. Über die dazugehörige Software Phantom Camera Control 9.2 lassen sich viel fältige Einstellungen, z. B. Auflösung, Bildrate und Helligkeitsabgleich vornehmen. Aufgrund der sehr hohen Lichtemission des Lichtbogens ist der Tropfenübergang nicht

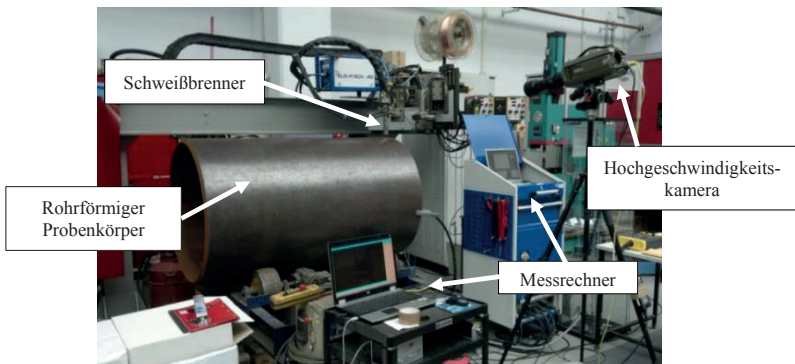


Abbildung 5.2-2: Versuchsstand zur Lichtbogenuntersuchung

ohne Weiteres beobachtbar. Zur Visualisierung wurde deshalb der gepulste Diodenlaser CAVILUX<sup>®</sup> HF der Firma Cavitac Ltd. mit der Wellenlänge von 810 nm verwendet. Ein entsprechender Filter vor dem Objektiv der Kamera lässt nur diese Wellenlänge passieren. Somit werden über das reflektierte Laserlicht der Werkstoffübergang sichtbar und der Lichtbogen ausgeblendet. Der Laser wurde mit der Software CAVILUX Control 4.2 gesteuert. Die Lichtimpulse des Lasers sind mit der Kamera getriggert, sodass bei jedem Lichtimpuls ein Bild aufgenommen wird.

Des Weiteren ist es für die Lichtbogenanalyse notwendig, synchron Stromstärke sowie Spannung aufzuzeichnen. Zur Messung wurden Stromstärke- und Spannungswandler der Firma LEM Holding SA genutzt. Der Spannungswandler funktioniert dabei wie ein definierter Transformator. Innerhalb des Belastungsbereiches wird die angelegte Spannung auf den maximalen Messbereich transformiert. Im festgelegten Übersetzungsverhältnis werden somit Messspannungen zwischen  $\pm 10$  V ausgegeben. Die zur Stromstärkemessung eingesetzten Stromwandler basieren auf dem Prinzip des HALL-Effektes. Dabei stellt das Stromkabel die Primärwindung dar und erzeugt ein Magnetfeld. Die senkrecht dazu angeordnete Spule bildet die Sekundärwindung. Der Sekundärstrom ist gegenüber dem zu messenden Primärstrom verringert und zwar umgekehrt proportional zum Verhältnis der Anzahl der Primär- und Sekundärwindungen. Die Hallspannung fällt dabei senkrecht sowohl zur Stromflussrichtung als auch zur Magnetfeldrichtung am Leiter ab. Über ein definiertes Übersetzungsverhältnis wird eine Messspannung im Bereich von  $\pm 10$  V generiert. Diese Messspannungen wurden über eine Messkarte der Firma Texas Instruments Incorporated erfasst und an das Computersystem übermittelt. Dabei sind maximale Abtastraten von  $f_{\text{Abtast}} = 100$  kHz möglich. Die Auswertung und Steuerung erfolgte über die Mess- und Analysesoftware DIAdem<sup>®</sup> der Firma National Instruments Corporation.

Zur Beurteilung der inneren Schweißnaht wurden Proben mittels Wasserabstrahlstrahlschneiden aus der Schweißnaht entnommen. Die Auswertungen erfolgten unter einem Mikroskop der Firma Carl Zeiss Microscopy GmbH. Für die Bildauswertung stand die Software AxioVision<sup>®</sup> zur Verfügung. Mit dieser wurden die Geometriegrößen der Schweißnähte vermessen. Von besonderem Interesse waren Einbrandtiefe, Nahtbreite und Querschnitt der Nahtüberhöhung als Maß für das abgeschmolzene Zusatzwerkstoffvolumen.

## 5.3 Lichtbogens Ausbildung und Werkstoffübergang

### 5.3.1 Versuchsparameter

Die systematisch durchgeführten Versuche gliedern sich nach Tabelle 5.3.1-1 in mehrere Abschnitte. Mit der Variation der Schweißleistung bei unterschiedlichen Stromquellencharakteristiken wurde begonnen. Dazu erfolgte die Erhöhung der Drahtfördergeschwindigkeit von  $2,0 \dots 5,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  in  $0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ -Schritten. Diese Untersuchungen wurden sowohl für die CV- als auch für die CC-Kennlinie durchgeführt. Um den Einfluss der Lichtbogenlänge auf die Prozessstabilität zu untersuchen, wurde diese verkürzt bzw. verlängert. Bei der CV-Kennlinie lässt sich die Lichtbogenlänge über die Spannung einstellen, weshalb bei jeder Drahtfördergeschwindigkeit die Spannung in 2 V-Schritten erhöht wurde. Ausgangspunkt war ein derart kurzer Lichtbogen, der wegen der geringen Schweißleistung erlischt und es zum Abschmelzen der Drahtelektrode über Widerstandserwärmung kommt. Bei der CC-Kennlinie lässt sich die Lichtbogenlänge über den Schweißstrom einstellen. Der Startwert der Stromstärke für die jeweilige Drahtvorschubgeschwindigkeit konnte aus den mittleren Stromwerten der Schweißungen mit CV-Kennlinie ermittelt werden. Von diesen ausgehend variiert der minimale und maximale Stromwert in einem gewählten Bereich von  $\pm 20 \text{ A}$ . Bestimmend für die maximale Stromstärke innerhalb einer Drahtvorschubgeschwindigkeit sind die Prozessstabilität, das Spritzerverhalten und das Abreisen des Lichtbogens.

Tabelle 5.3.1-1: Versuchsmatrix zur Lichtbogenuntersuchung

Kennlinien	CV-Kennlinie				CC-Kennlinie		
Drahtvorschubgeschwindigkeit $v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Variation Schweißleistung	$U_{\min} < U_{\text{Einstell}} < U_{\max}$ $U_{\min} = 30 \text{ V},$ $U_{\max} = 46 \text{ V}$				$I_{\min} < I_{\text{Einstell}} < I_{\max}$ $-20 \text{ A} \sim I_{\text{CV}} + 20 \text{ A}$ $I_{\text{Einstell}} = \sim I_{\text{CV}}$		
Variation Schutzgaszu- sammensetzung	$v_d = 3,5 \text{ m·min}^{-1}$						
	$U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$				$I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$		
Zumischung Argon [%]	0	25	50	82	100		
Variation Kon- taktrohr- abstand	$v_d = 3,5 \text{ m·min}^{-1}$						
	$U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$				$I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$		
Kontaktrohr- abstand [mm]	10	20	30	40	50	70	

Für die Lichtbogenuntersuchungen fand reines  $\text{CO}_2$  Anwendung. Versuche zur Variation des Schutzgases erfolgten mit reinem Ar und Gemischen aus Ar (25, 50, 82 %) und  $\text{CO}_2$ . Die Versuche wurden mit einer einheitlichen Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und einer Spannung von 38 V (CV) bzw. einer Stromstärke von 810 A (CC) durchgeführt. Der Einfluss der freien Drahtlänge (10 bis 70 mm) wurde mit denselben Parametern untersucht. Anschließend konnten Lichtbogenausbildung (auftretende Lichtbogenart) und Werkstoffübergang ausgewertet sowie beurteilt werden.

Kennzeichnend für die Lichtbogenarten sind Lichtbogenlänge, Auftreten von Werkstoffübergängen im Kurzschluss sowie Frequenz und Größe, mit denen die Tropfen ins Schmelzbad übergehen. Die Unterscheidung zwischen Übergangs- und Langlichtbogen bzw. Sprüh- und Langlichtbogen erfolgt über die Bestimmung der Tropfengröße. In dieser Arbeit werden als charakteristisch für einen Langlichtbogen große bis sehr große Tropfen (Tropfendurchmesser  $>$  Drahtdurchmesser) und beim Sprühlichtbogen feine bis mittelgroße Tropfen (Tropfendurchmesser  $<$  Drahtdurchmesser) definiert. Die Einordnung der Lichtbogenarten in Abhängigkeit der Tropfengrößen ist in Tabelle 5.3.1-2 angegeben. Die Tropfengröße wurde mit Hilfe der Software AxioVision<sup>®</sup> aus Einzelbildern der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt.

Tabelle 5.3.1-2: Bestimmung der Lichtbogenart nach Tropfengröße

Tropfengröße in Bezug zum Drahtdurchmesser $d_d$	zugeordnete Tropfengröße	Einordnung der Lichtbogenart SLB/LLB zur Tropfengröße
1/4 bis $1/2 \times d_d$	fein	SLB
1/2 bis $2/3 \times d_d$	mittel	
2/3 bis $1 \times d_d$	groß	LLB
$> 1 \times d_d$	sehr groß	

Falls nach dieser Einteilung die Lichtbogenart nicht zugeordnet werden kann, wird die Lichtbogenlänge genutzt. Der Langlichtbogen ist dadurch gekennzeichnet, dass er außerhalb der Blechoberfläche brennt. Da für die Versuche die Lichtbögen teilweise sehr kurz eingestellt wurden, ist eine Bestimmung der Lichtbogenlänge nicht ohne Weiteres möglich. Deshalb wurde das Auftreten von Kurzschlüssen und von Werkstoffübergängen ohne Kurzschlüsse in die Betrachtung einbezogen. Tabelle 5.3.1-3 zeigt die Einordnung der Lichtbogenarten hinsichtlich des Kurzschlussverhaltens.

Mit Hilfe der Ergebnisse des Prozessverhaltens wurde der nutzbare Parameterbereich festgelegt und entsprechende  $U/I$ -Diagramme erstellt.

Tabelle 5.3.1-3: Bestimmung der Lichtbogenart nach Auftreten von Kurzschlüssen beim Werkstoffübergang

		Auftreten von Kurzschlüssen?	
		ja	nein
Werkstoffübergang ohne Kurzschluss?	ja	ÜLB oder LLB	SLB oder LLB
	nein	Kurzlichtbogen	Keine Lichtbogenart

### 5.3.2 Schweißleistung

Die Lichtbogenart und der Werkstoffübergang beim MSG-Schweißen sind im Wesentlichen von der Schweißleistung abhängig. Daher ist eine grundlegende Untersuchung dieser Einflussgröße notwendig, um die in Kapitel 5.3.1 vorgenommene Einordnung der Lichtbogenarten und Werkstoffübergänge durchführen zu können. In diesem Kapitel werden deshalb Anfangs die Werkstoffübergänge beim MSG-Dickdraht-Schweißen analysiert. Im Weiteren werden im Hinblick auf die Prozessstabilität Grenzen der Schweißleistung für die Schweißmaschinen-Kennlinien (CV-, CC-Charakteristik) ermittelt.

Durch die Auswertung der  $U/I$ -Kurven und der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen lässt sich feststellen, dass der Werkstoffübergang auf verschiedene Arten abläuft. Im Folgenden sind die in den Versuchen ermittelten Werkstoffübergänge beschrieben.

Variante 1 ist durch dadurch gekennzeichnet, dass der anwachsenden Tropfen eine Werkstoffbrücke zum Schmelzbad herstellt. Daraufhin kommt es zum Kurzschluss (Abbildung 5.3.2-1;  $0,03 \text{ s} < t < 0,045 \text{ s}$ ) bzw. zu einem kurzschlussartigen Spannungsabfall (Abbildung 5.3.2-2;  $0,01 \text{ s} < t < 0,02 \text{ s}$ ). Ein Kurzschluss mit einem Spannungsabfall auf null stellt dabei die Ausnahme dar. I. d. R. ist ein kurzschlussartiger Spannungsabfall zu beobachten. Aufgrund der hohen induzierten Pinchwirkung und der schnellen Regelung der Schweißmaschine wird die Werkstoffbrücke bereits unterbrochen, bevor die Spannung auf null absinkt.

Die Variante 2 des Werkstoffübergangs stellt die Tropfenablösung ähnlich wie im klassischen Sprühlichtbogen dar. Dabei geht der Tropfen, nur mit einem „geringen“ Ausschlag in der Spannungskurve (Schwankung um Mittelwert der Spannung max.  $\Delta U_s \approx 10 \text{ V}$ ), in das Schmelzbad über. Abbildung 5.3.2-3 zeigt derartige Tropfenablösungen im  $U/I$ -Diagramm im Zeitbereich zwischen  $2,5 \cdot 10^{-3}$  und  $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  sowie zwischen  $10 \cdot 10^{-3}$  und  $15 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ .

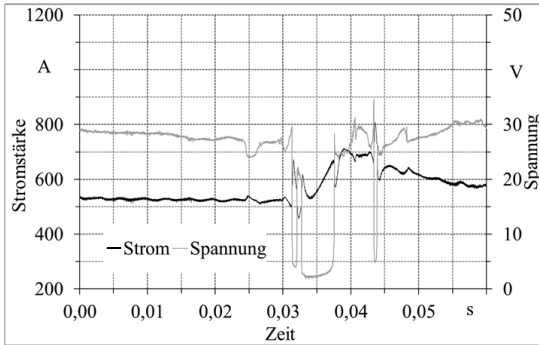


Abbildung 5.3.2-1: Werkstoffübergang mit Kurzschluss  
 CC-Kennlinie;  $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $I_{\text{Einstell}} = 515 \text{ A}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

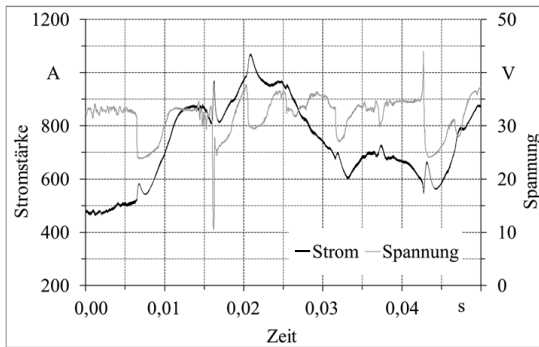


Abbildung 5.3.2-2: Werkstoffübergang mit kurzschlussartigem Spannungsabfall  
 CV-Kennlinie;  $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Die weiteren Varianten 3 und 4 gehen auf eine während der Beobachtung des Werkstoffübergangs bemerkte Besonderheit ein. Die  $U/I$ -Verläufe sowie die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen lassen ein kurzzeitiges Erlöschen des Lichtbogens aufgrund der Änderung der Strahlungsemission im gefilterten Bereich (810 nm) während der Tropfenablösung vermuten. Dieser Vorgang kann sowohl mit als auch ohne zeitgleichen Kurzschluss bzw. kurzschlussartigem Spannungsabfall auftreten. Hauptsächlich kommt diese Art des Werkstoffübergangs bei langen Lichtbögen unter Bildung sehr großer Tropfen vor.

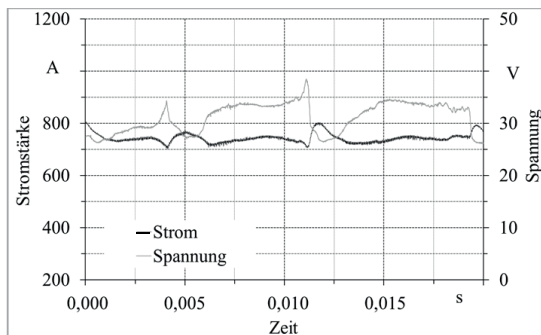


Abbildung 5.3.2-3: Werkstoffübergang ohne Kurzschluss  
CC-Kennlinie;  $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $I_{\text{Einstell}} = 730 \text{ A}$ ;  
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Die Variante 3 ohne begleitenden Kurzschluss ist in Abbildung 5.3.2-4 zu sehen. Es zeigt sich, dass direkt nach der Tropfenablösung (Abbildung 5.3.2-4 a),  $t = 0,01 \text{ s}$  die Strahlungsintensität zunächst abschwächt (Abbildung 5.3.2-4 b),  $t = 0,011 \text{ s}$  und kurz darauf wieder ansteigt (Abbildung 5.3.2-4 c),

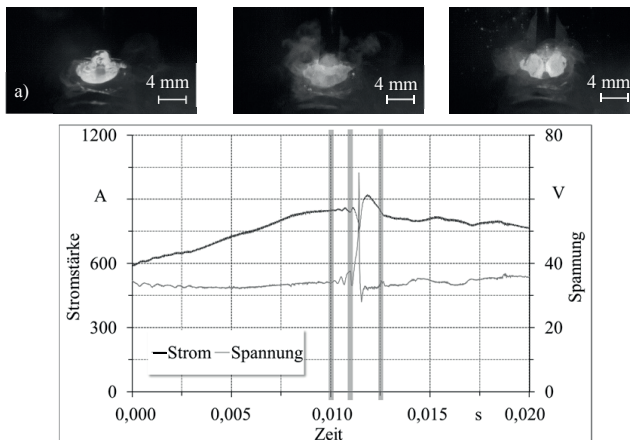


Abbildung 5.3.2-4: Werkstoffübergang mit Änderung der Strahlungsintensität des Lichtbogens ohne Kurzschluss  
CV-Kennlinie;  $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$ ;  
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

$t = 0,0125$  s). Im  $U/I$ -Verlauf ist dabei ein Ausschlag in der Spannungskurve nach oben zu sehen. Begründet wird dieses Verhalten anhand der schematischen Darstellung in Abbildung 5.3.2-5. Der Ansatz des Lichtbogens an der Drahtelektrode befindet sich am schmelzflüssigen Tropfen, welcher sich nach Erreichen einer bestimmten Größe durch die Schwerkraft und die Pinchwirkung des elektromagnetischen Feldes von der Drahtelektrode löst. Im Moment der Ablösung des Tropfens erfolgt eine plötzliche Längenänderung des Lichtbogens, welche zum Abreißen des Lichtbogens führt. An der Drahtelektrode liegt dann die Leerlaufspannung von 70 V (siehe Abbildung 5.3.2-4  $t = 0,0112$  s) an.

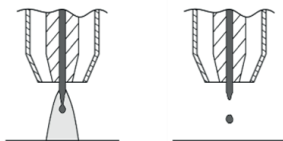


Abbildung 5.3.2-5: Schema zum Ausgehen des Lichtbogens

In der Variante 4 mit kurzschlussartigem Spannungsabfall und Änderung der Lichtbogenintensität stellt das schmelzflüssige Drahtende eine Verbindung zwischen Elektrode und Schmelzbad her. Abbildung 5.3.2-6 zeigt dazu einen  $U/I$ -Verlauf mit Einzelbildern des Werkstoffübergangs im Zeitbereich von 0 bis 0,02 s. In Abbildung 5.3.2-6 a) ist der schmelzflüssige Tropfen am Drahtende und der brennende Lichtbogen ersichtlich. Die geringere Lichtbogenintensität aufgrund einer Kurzschlussbrücke bzw. einem kurzschlussartigen Spannungsabfall ist in Abbildung 5.3.2-6 b) zu erkennen. Der Abbildung 5.3.2-6 c) ist eine ähnliche Intensität des Lichtbogens wie zuvor in Abbildung 5.3.2-6 a) zu entnehmen.

Zur Ermittlung des Prozessfensters werden im Folgenden die Schweißmaschinen-Kennlinien untersucht.

#### Konstant-Spannungs-Kennlinie

Tabelle 5.3.2-1 zeigt einen Ausschnitt aus den Lichtbogenuntersuchungen zur CV-Kennlinie. In den Versuchen wurde die eingestellte Spannung in 2 V-Schritten zwischen einem minimalen (30 V) und einem maximalen (46 V) Wert variiert. Entsprechend der festgelegten Drahtvorschubgeschwindigkeit folgte in den angegebenen Schritten die Zuordnung der Spannungswerte.

Es ist zu beachten, dass eine Differenz zwischen eingestellter und mittlerer gemessener Spannung vorliegt. Diese beträgt etwa 5,5 V. Abbildung 5.3.2-7 zeigt schematisch den Versuchsaufbau zur Spannungsmessung. Mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Messsystem wurden drei Messungen und einer ein-



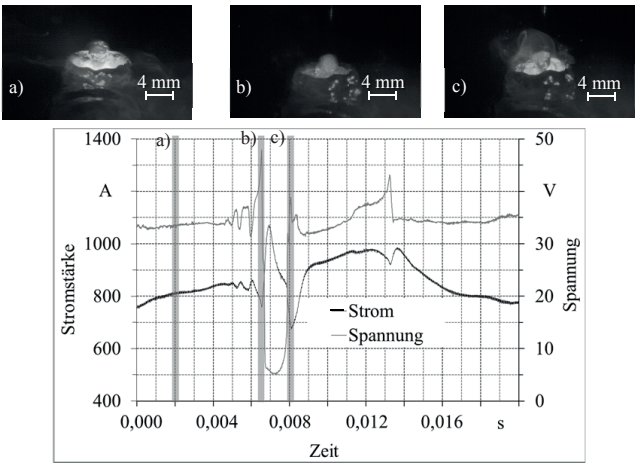


Abbildung 5.3.2-6: Werkstoffübergang mit Änderung der Strahlungsintensität des Lichtbogens und Kurzschluss  
CV-Kennlinie;  $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$ ;  
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Tabelle 5.3.2-1: Einstellparameter zur Lichtbogenuntersuchung mit CV-Kennlinie

$v_d [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$U_{\text{Einstell}} [\text{V}]$	$U_{\text{min}} < U_{\text{Einstell}} < U_{\text{max}}$ ; $\Delta U_{\text{Einstell}} = 2 \text{ V}$						

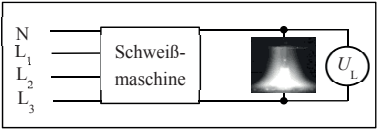


Abbildung 5.3.2-7: Schematische Darstellung der Spannungsmessung am Lichtbogen

gestellten Spannung von 40 V ausgewertet. Daraus ergab sich für die Spannung ein arithmetischer Mittelwert von 34,6 V.  
Zurückzuführen ist der Spannungsabfall hauptsächlich auf die brennerseitig rund  $3 \times 7 \text{ m}$  und werkstückseitig etwa 3 m langen Schweißstromkabel. Die nachfolgende Berechnung, bei der die Spannungsabfälle in den Zuleitungen und im Werkstück exemplarisch für die Stromstärke von 653 A ermittelt werden, bestätigt die Annahme.

$$U = R \cdot I = \rho_d \cdot \frac{l_{\text{Leiter}}}{A_{\text{Leiter}}} \cdot I \quad (12)$$

$$U_{\text{Kabel 1}} = 0,0179 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{3 \cdot 7 \text{ m}}{70 \text{ mm}^2} \cdot 653 \text{ A} = 3,51 \text{ V}$$

$$U_{\text{Kabel 2}} = 0,0179 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{3 \text{ m}}{70 \text{ mm}^2} \cdot 653 \text{ A} = 0,5 \text{ V}$$

$$U_{\text{Rohr}} = 0,13 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{1,2 \text{ m}}{156,3 \text{ mm}^2} \cdot 653 \text{ A} = 0,65 \text{ V}$$

$$U_{\text{ges}} = U_{\text{Kabel 1}} + U_{\text{Kabel 2}} + U_{\text{Rohr}} = 4,66 \text{ V}$$

Allein in den Zuleitungen ergibt sich ein Spannungsabfall von 4,7 V. Weitere Spannungsabfälle ergeben sich an den Masseklemmen am Bauteil.

Die Reglungsart ist bei der CV-Kennlinie eine sog. innere Regelung, d. h. eine  $\Delta I$ -Reglung. Bei dieser führt eine Änderung der Lichtbogenlänge zu einer Anpassung der Stromstärke (Vgl. Kapitel 2.1.2, Abbildung 2.1.2-3). Zwei Einstellparameter bei der CV-Charakteristik sind Schweißspannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit. Die Stromstärke ist an den Drahtvorschub gekoppelt und erhöht sich mit steigender Drahtförderrate. Verschiebungen der Arbeitspunkte (Abbildung 2.1.2-3  $A_1$  und  $A_2$ ) sind durch Änderungen der Einstellwerte möglich. Eine Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit führt bei gleichbleibender Spannung mit dieser Stromquellen-Kennlinie zu einer Verkürzung des Lichtbogens. Der Arbeitspunkt verschiebt sich auf der Stromquellen-Kennlinie nach rechts. Umgekehrt ergibt eine höher eingestellte Spannung ohne Änderung der Drahtförderrate eine Steigerung der Lichtbogenlänge. Der Arbeitspunkt wechselt dadurch auf eine parallel nach oben verschobene Stromquellen-Kennlinie. Soll die Abschmelzleistung bei einer konstanten Lichtbogenlänge gesteigert werden, ist die Anpassung sowohl der Drahtvorschubgeschwindigkeit als auch der Spannung erforderlich.

Das Diagramm in Abbildung 5.3.2-8 gibt einen Überblick zu den durchgeführten Schweißversuchen entsprechend der oben angegebenen Versuchsmatrix (Tabelle 5.3.1-1). Die eingetragenen Diagrammpunkte stellen die arithmetischen Mittelwerte der Stromstärke dar, die zu den einzelnen Drahtvorschubgeschwindigkeiten gemessen wurden. Die Ermittlung von Stromstärke und Spannung erfolgte ebenfalls mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Messsystem und der angegebenen Abtastezeit. Für jeden Messpunkt wurde eine Schweißzeit von 2 s ausgewertet und der arithmetische Mittelwert berechnet. Die im Diagramm an die Messpunkte angetragenen Spannungswerte sind die an der Schweißmaschine eingestellten Größen. Diese liegen, wie oben ausgeführt und aus dem Diagramm ersichtlich, etwa 5,5 V höher als die gemessenen, mittleren Spannungen, welche an der Ordinatenachse abzulesen sind. Eine Erhöhung

der Drahtvorschubgeschwindigkeit bei konstant eingestellter Spannung führt dazu, dass die gemessene Spannung entsprechend der eingestellten Neigung der Schweißmaschinen-Kennlinie ( $0,5 \text{ V} \cdot (100 \text{ A})^{-1}$ ) sinkt.

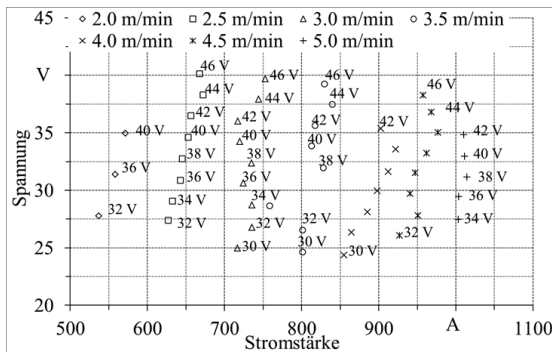


Abbildung 5.3.2-8: Untersuchtes Parameterfenster bei der CV-Kennlinie  
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Da das MSG-Schweißen mit „dicken“ Drahtelektroden als Hochleistungsschweißverfahren einzuordnen ist, werden Drahtvorschubgeschwindigkeiten unter  $2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $MR < 8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) als nicht zielführend angesehen und nicht betrachtet. Als obere Grenze lässt sich eine Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $5,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  festlegen. Hier stellen sich Stromstärken von etwa  $1000 \text{ A}$  bei Lichtbogenspannungen von  $31 \text{ V}$  ein. Aufgrund des Lichtbogendruckes wird das Schmelzbad entgegen der Schweißrichtung verdrängt und erfährt durch die Stromerhöhung im Moment der Tropfenablösung infolge der Lichtbogenlängenänderung sichtbare Impulse, die zu einer wellenförmigen Schmelzbadbewegung führen. Der am Drahtende wandernde Lichtbogen verhindert, dass die schmelzflüssigen Tropfen im Schmelzbad landen und schleudert diese als Spritzer von der Fugestelle weg, sodass ein regelrechtes Ausfugen des Grundwerkstoffes stattfindet. Die Schneidwirkung des Lichtbogens tritt auch bei geringeren Drahtvorschubgeschwindigkeiten ( $v_d = 4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $I = 900 \text{ A}$ ) und höheren Spannungen ( $U_s > 35 \text{ V}$ ) auf. Dieser Effekt ist also sekundär von der Stromstärke und primär von der Schweißleistung abhängig. Die Auswertungen des Tropfenüberganges ergaben eine Übertragbarkeit der Zusammenhänge auf verschiedene Drahtvorschubgeschwindigkeiten.

Im Folgenden wird der Unterschied zwischen hoch und niedrig eingestellter Schweißspannung exemplarisch an der Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  gespiegelt. In Abbildung 5.3.2-9 sind die Lichtbögen und die Werkstoffübergänge für die eingestellte Spannung von  $32 \text{ V}$  und  $40 \text{ V}$  gegenübergestellt. Das linke Bild der Abbildung 5.3.2-9 zeigt deutlich, dass bei der niedrige-

ren Spannung der Lichtbogen unterhalb der Blechoberfläche im Schmelzbad brennt. Mit einer Erhöhung der Spannung geht eine Zunahme der Lichtbogenlänge einher (Abbildung 5.3.2-9 rechts). Der Lichtbogenansatz an der Elektrode liegt dann außerhalb des Bleches.

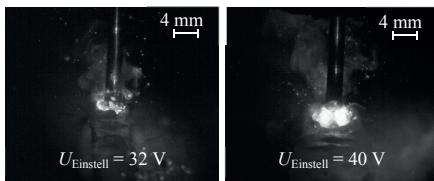


Abbildung 5.3.2-9: Lichtbögen bei unterschiedlicher Spannung; CV-Kennlinie  
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

In Abbildung 5.3.2-10 ist dieser Unterschied zwischen geringer und hoher Spannung anhand einer schematischen Schnittdarstellung zu sehen. Aufgrund der kurzen Lichtbogenstrecke erfolgen bedeutend mehr Werkstoffübergänge mit kurzschlussartigem Spannungsabfall. Längere Lichtbögen führen infolge des wandernden Lichtbogenansatzes an der Drahtelektrode bei Verwendung  $\text{CO}_2$ -haltiger Schutzgase zu großen Tropfen, wodurch diese seltener und oft kurzschlussfrei ins Schmelzbad übergehen.

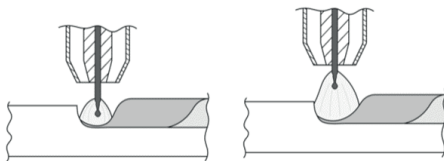


Abbildung 5.3.2-10: Schematische Darstellung des Schweißens mit niedriger und hoher Lichtbogenspannung

Bei Verwendung größerer Drahtdurchmesser ( $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ ) treten die oben beschriebenen Effekte (Schneidwirkung ab Schweißleistung  $> 30 \text{ kW}$ ) ebenfalls auf. Die Parameter verschieben sich entsprechend zu höheren Stromstärken bei geringerer Drahtvorschubgeschwindigkeit.

Ergänzend zu den Momentaufnahmen des Werkstoffübergangs bei 32 und 40 V in Abbildung 5.3.2-9 zeigen die Abbildung 5.3.2-11 (32 V) und Abbildung 5.3.2-12 (40 V) Ausschnitte aus den dazugehörigen  $U/I$ -Verläufen. Bei 32 V eingestellter Spannung sind die arithmetischen Mittelwerte für Stromstärke 626,7 A und Spannung 27,4 V sowie für 40 V eingestellter Spannung 652,7 A

und 34,6 V. Die Bestimmung der Mittelwerte erfolgte mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Messsystem durch die Auswertung von 2 s Schweißzeit.

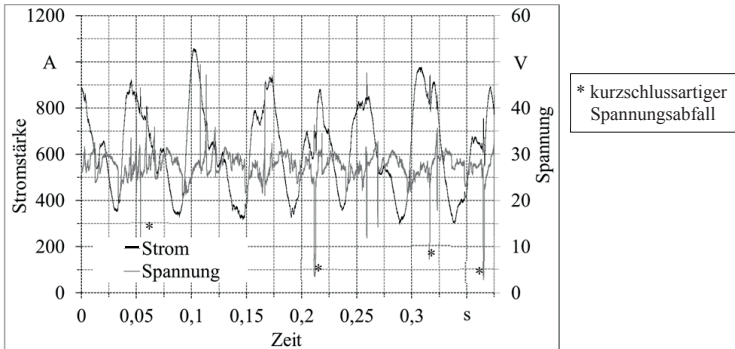


Abbildung 5.3.2-11:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$   
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

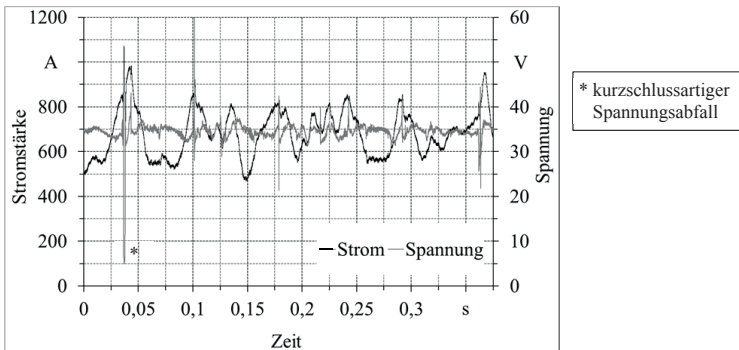


Abbildung 5.3.2-12:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$   
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Ein kurzer Lichtbogen brennt mit einer eingestellten Spannung von 32 V (Abbildung 5.3.2-9 links). Dies ist auch im Verlauf der Spannungskurve (Abbildung 5.3.2-11) durch die zahlreichen kurzschlussartigen Spannungsabfälle ersichtlich. Jeweils beim Strommaximum wird ein Tropfen abgelöst. Der An- und Abstieg in der Stromkurve resultiert dabei aus einer Änderung der Lichtbogenlänge. Der anwachsende Tropfen führt zu einer Verkürzung des Lichtbogens. Entsprechend der Schweißmaschinen-Kennlinie (siehe Abbildung 2.1.2-3) steigt die Stromstärke an. Nach der Tropfenablösung vergrößert sich die Lichtbogenlänge wieder und bewirkt das Sinken der Stromstärke. Die

Amplitude beträgt bis zu 700 A. Aus der Stromänderung ergibt sich eine starke Schwankung der Schweißleistung. Die Spannweite liegt im Bereich zwischen 9,3 und 28,2 kW (Vgl. Kapitel 5.3.5). Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass beim Kurzlichtbogenschweißen die Höhe des Stromanstieges im Kurzschluss die Anzahl der Spritzer bestimmt. Die hohen Stromstärken bewirken eine Überhitzung des schmelzflüssigen Tropfens und führen zur Senkung der Oberflächenspannung, was ebenfalls zur Spritzerbildung beiträgt. In Abbildung 5.3.2-13 sind dazu zwei Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit zeitlicher Zuordnung zum  $U/I$ -Verlauf dargestellt. Der Zeitpunkt  $t = 0,15$  s ist vor einem Stromanstieg. Vereinzelt sind im Bild (Abbildung 5.3.2-13 a)) Spritzer (helle Punkte), die im vorhergehenden Stromanstieg entstanden sind, zu sehen. In Abbildung 5.3.2-13 b) ist der Zeitpunkt der Aufnahme kurz nach einem Strommaxima. Es ist zu erkennen, dass Spitzer von der Schweißstelle weggeschleudert werden.

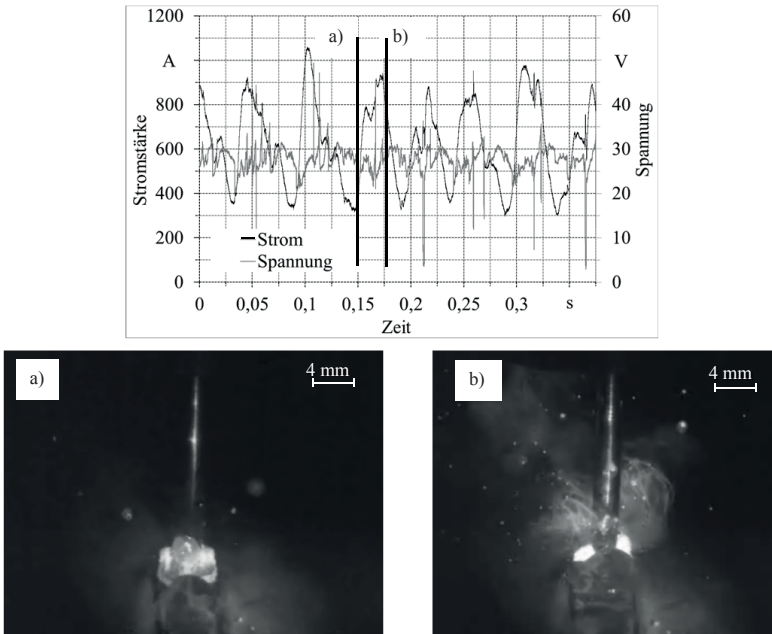


Abbildung 5.3.2-13:  $U/I$ -Verlauf und Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 32$  V  
 $v_d = 2,5$  m·min<sup>-1</sup>; Drahtelektrode  $\varnothing$  3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1

Die in Abbildung 5.3.2-9 gegenübergestellte Veränderung der Spannung von 32 auf 40 V bedingt nicht nur die Verlängerung der Lichtbogenstrecke, sondern hat zur Folge, dass wesentlich weniger Tropfen mit einem kurzschlussartigen Spannungsabfall ins Schmelzbad übergehen (Abbildung 5.3.2-12). Die Schwankung der Stromstärke fällt bei höher eingestellten Spannungen geringer aus. Die Amplitude der Stromstärke beträgt hier bis zu 450 A. Aufgrund der geringeren Schwankungen der Schweißleistung sind die Änderungen des Lichtbogendruckes sowie der LORENTZ-Kraft reduziert. Dadurch ist die Schmelzbadbewegung reduziert. Weiterhin erhöht sich durch eine Steigerung der Lichtbogenlänge die Tropfengröße. Die Frequenz der Tropfenablösung nimmt ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass hohe Stromstärkeschwankungen zu Prozessinstabilitäten sowie Spritzern führen. Deshalb wurden Schweißversuche mit Strombegrenzung durchgeführt. Abbildung 5.3.2-14 zeigt den  $U/I$ -Verlauf mit Begrenzung der Stromstärke ( $500 \text{ A} < I < 700 \text{ A}$ ) und Abbildung 5.3.2-15 ohne Begrenzung. Beim Vergleich der Stromverläufe lässt sich der Unterschied anhand der Stromamplituden erkennen. Die Schwankungsbreite des Stromes liegt mit Begrenzung bei etwa 200 A und ohne Begrenzung bei etwa 700 A. Mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte ein Einfluss auf das Prozessverhalten und insbesondere auf das Spritzerverhalten festgestellt werden. Beim Vergleich der Einzelbilder aus Abbildung 5.3.2-14 mit denen aus Abbildung 5.3.2-13 wird ersichtlich, dass eine Senkung der Stromstärkeamplituden sowohl zur Reduzierung der Spritzer als auch der Schmelzbadbewegung führt. Die Schmelzbadwelle ist in den beiden Einzelbildern der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Abbildung 5.3.2-13 zu erkennen. Ein deutlich ruhiges Schmelzbad ist hingegen bei den Einzelbildern in Abbildung 5.3.2-14 zu sehen. Die vom MSG-Schweißen mit Drahtdurchmessern  $< 2,4 \text{ mm}$  bekannten Lichtbogenarten treten beim Schweißen mit „dicken“ Drahtelektroden ( $\geq 3,2 \text{ mm}$ ) und der CV-Kennlinie nur bedingt auf. Ein klassischer Kurzlichtbogen mit periodischer Tropfenablösung bei Stromstärkespitzen sowie Kurzschluss kann beim MSG-Dickdraht-Schweißen weder mit Lichtbögen, deren Ansatzpunkt an der Drahtelektrode unterhalb der Blechoberfläche (Abbildung 5.3.2-10 links) ist noch bei oberhalb der Blechoberfläche ansetzenden Lichtbögen (Abbildung 5.3.2-10 rechts) beobachtet werden. Zwar erfolgt eine periodisch wiederkehrende Stromstärkeschwankung mit Tropfenübergang bei kurzen Lichtbögen (Abbildung 5.3.2-11) aber ohne Kurzschluss ( $U_s \neq 0 \text{ V}$ ). Ein Teil der Tropfen löst sich bei den im Schmelzbad brennenden Lichtbögen bereits ohne kurzschlussartigen Spannungsabfall. Deutlich wird dies bei der Betrachtung der Einzelbilder zum Zeitpunkt  $t = 0,15$  und  $0,175 \text{ s}$  (Werkstoffübergang ohne kurzschlussartigen Spannungsabfall) aus Abbildung 5.3.2-13.

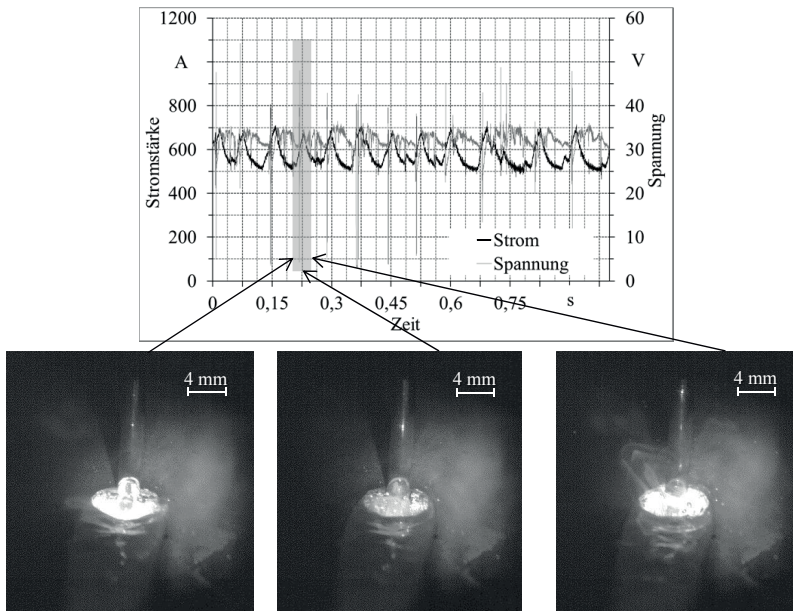


Abbildung 5.3.2-14:  $U/I$ -Verlauf und Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie und Begrenzung des Stromes ( $500 \text{ A} < I < 700 \text{ A}$ )  
 $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $U_{\text{Einstell}} = 36 \text{ V}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

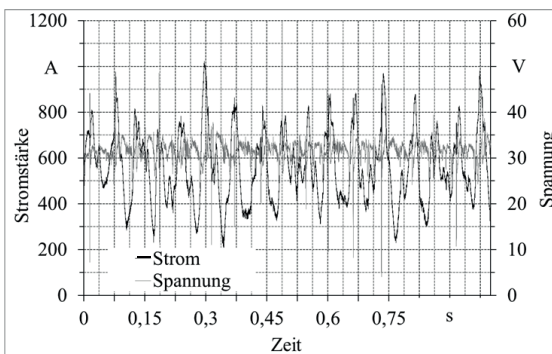


Abbildung 5.3.2-15:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie ohne Begrenzung des Stromes  
 $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $U_{\text{Einstell}} = 36 \text{ V}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1



Abbildung 5.3.2-16 zeigt zum Vergleich Einzelbilder des Werkstoffüberganges mit kurzschlussartigem Spannungsabfall im Zeitbereiches zwischen 0,2 und 0,23 s dieser Schweißung. Diese Art des Werkstoffüberganges tritt bei allen untersuchten Drahtvorschubgeschwindigkeiten mit eingestellten Spannungen von bis zu 38 V auf.

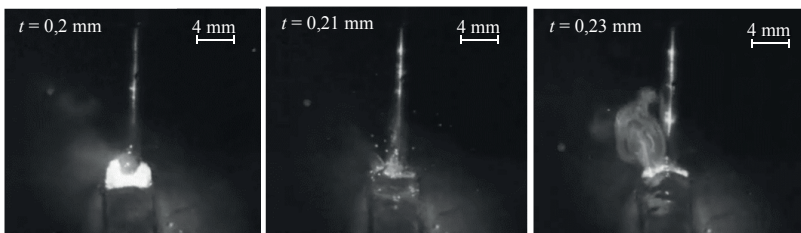


Abbildung 5.3.2-16: Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$   
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Eine Zunahme der Lichtbogenlänge führt zu einer aperiodischen Tropfenablösung (Stromstärkeschwankung in Abbildung 5.3.2-12). Auch hier fällt die Spannung bei der Tropfenbildung bzw. beim Werkstoffübergang nicht auf null ab. Diese Art des Werkstoffüberganges ist dem Langlichtbogen zuzuordnen, da eine Vielzahl von Tropfen kurzschlussfrei ins Schmelzbad übergehen. Ab einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  brennt der Lichtbogen auch bei Erhöhung der Spannung immer unterhalb der Blechoberfläche. Der Werkstoffübergang erfolgt dabei meist mit feinen Tropfen. Kurzschlussartige Spannungsabfälle treten nur vereinzelt auf. Daher liegt in diesem Bereich kein Langlichtbogen, sondern ein Sprühlichtbogen vor.

Abbildung 5.3.2-17 zeigt eine Übersicht zur Lage der ermittelten Lichtbogenarten im  $U/I$ -Diagramm. Es lassen sich die drei Bereiche Übergangs- und Langlichtbogen sowie sprühlichtbogenartig eingrenzen. Die Variation der elektrischen Parameter reicht für die Stromstärke von etwa 550 bis 1000 A und für die Spannung von 30 bis 46 V. Aus dem Diagramm geht hervor, dass bei einer minimalen Spannung von 30 V der Bereich des Übergangslichtbogens beginnt. Unterhalb dieser Spannung brennt kein Lichtbogen und der Draht schmilzt lediglich durch Widerstandserwärmung ab. Definiert wurde der Übergangslichtbogen anhand der Tropfengröße (Vgl. Tabelle 5.3.1-2) und des Werkstoffüberganges (Vgl. Tabelle 5.3.1-3). Im gesamten untersuchten Leistungsbereich stellt sich bei einer eingestellten Spannung von bis zu 36 V ein Übergangslichtbogen ein. Bei eingestellten Spannungen über 36 V entstehen bis zu einer Stromstärke von 900 A keine kurzschlussartigen Werkstoffübergänge, sodass

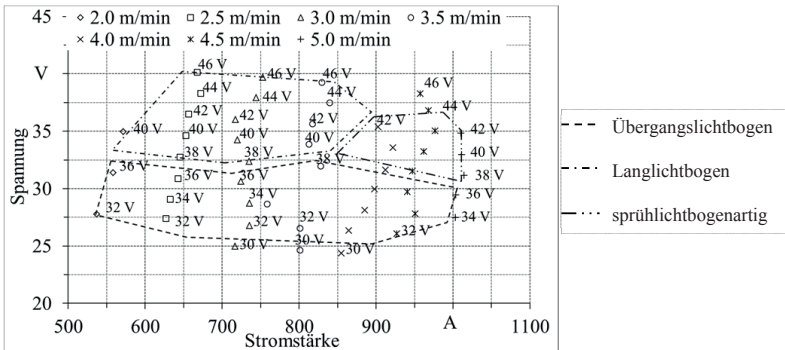


Abbildung 5.3.2-17: Bereiche der Lichtbögen im  $U/I$ -Diagramm der CV-Kennlinie

nach der eigenen Definition (Tabelle 5.3.1-3) ein Langlichtbogen vorliegt. Die maximale Spannung beträgt 46 V. Noch höhere Spannungen erzeugen einen langen Lichtbogen, der zum Schneiden des Grundwerkstoffes führt (Abbildung 5.3.2-18). Ein sprühlichtbogenartiger Werkstoffübergang stellt sich ab Stromstärke von etwa 850 A bei Spannungen über 36 V ein.

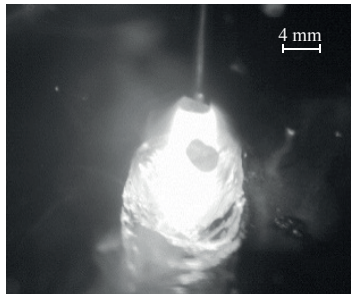


Abbildung 5.3.2-18: Langer Lichtbogen mit „Schneid-Effekt“

Durch eine Prozessanalyse konnte festgestellt werden, dass es bei den Schweißversuchen mit der CV-Kennlinie im gesamten untersuchten Parameterbereich zu Schweißspritzern kommt. Zurückzuführen ist das Entstehen der Spritzer hauptsächlich auf den Anstieg der Stromstärke, hervorgerufen durch die Änderung der Lichtbogenlänge. Die Stromstärke erreicht dann ein Maximum und das schmelzflüssige Elektrodenende wird als Tropfen abgelöst. Aufgrund der hohen Stromstärken werden die Tropfen bei der Ablösung regelrecht weggesprengt (Abbildung 5.3.2-13 b)). Des Weiteren konnte festgestellt

werden, dass beim Kontakt des Schmelzbades mit der Drahtelektrode Spritzer entstehen. Die wellenförmige Schmelzbadbewegung wird aufgrund der Stromstärkeschwankungen hervorgerufen (siehe Abbildung 5.3.2-13 und Abbildung 5.3.2-16).

### Konstant-Strom-Kennlinie

Die Tabelle 5.3.2-2 zeigt die zu variierenden Parameter. Für jede Drahtvorschubgeschwindigkeit wird die Stromstärke ( $I_{\text{Einstell}}$ ) festgelegt und von einem minimalen ( $I_{\text{min}}$ ) zu einem maximalen Wert ( $I_{\text{max}}$ ) geändert.

Tabelle 5.3.2-2: Einstellparameter zur Lichtbogenuntersuchung mit CC-Kennlinie

$v_d$ [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$I_{\text{Einstell}}$ [A]	$I_{\text{min}} < I_{\text{Einstell}} < I_{\text{max}}$						

Die Regelungsart ist unter der CC-Kennlinie eine äußere Regelung, d. h. eine  $\Delta U$ -Regelung (Vgl. Abbildung 2.1.2-7). Eine Veränderung der Lichtbogenlänge bewirkt eine Änderung der Spannung. Beim UP-Schweißen wird der Ausgleich der Spannungsänderung über die Anpassung der Motordrehzahl des Drahtvorschubantriebs geregelt. Die für die Versuche verwendete Schweißmaschine korrigiert die Lichtbogenlänge stromquellenintern durch die Regelung der Spannung.

Im Diagramm der Abbildung 5.3.2-19 sind die untersuchten Drahtvorschubgeschwindigkeiten mit den unterschiedlich eingestellten Stromstärken zu sehen. Die angetragenen Stromstärkewerte sind die Einstellwerte. An der Ordinatenachse sind die ermittelten arithmetischen Mittelwerte der Spannung und an der Abszissenachse die ermittelten arithmetischen Mittelwerte der Stromstärke abzulesen. Die Mittelwerte wurden mit der unter Kapitel 5.2 aufgeführten Methode gemessen. Zur Auswertung wurde eine Schweißzeit von 2 s herangezogen.

Zum Vergleich der Schweißmaschinen-Kennlinien wurden die gleichen Drahtvorschubgeschwindigkeiten wie bei den Versuchen mit der CV-Kennlinie eingestellt. Die Ergebnisse der Schweißversuche mit der CC-Kennlinie zeigen, dass bei Drahtvorschubgeschwindigkeit von über  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  kein stabiler Schweißprozess möglich ist. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass der Lichtbogen ab dieser Drahtvorschubgeschwindigkeit nur noch unter der Blechoberfläche brennt und ein feintropfiger Werkstoffübergang stattfindet. Dabei ist ein Schneiden des Grundwerkstoffes festzustellen, wodurch sich keine Schweißnaht mehr ausformt.

Anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wird weiterhin der Zusammen-

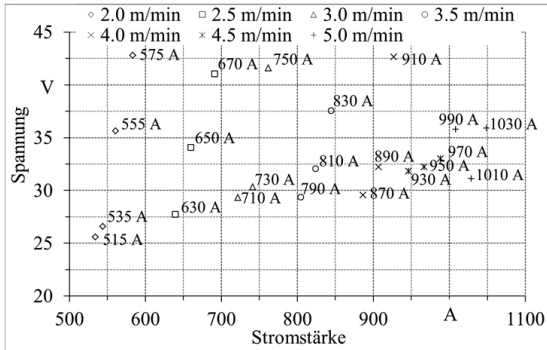


Abbildung 5.3.2-19: Untersuchtes Parameterfenster bei der CC-Kennlinie

hang zwischen eingestellter Stromstärke und Lichtbogenlänge ersichtlich. Bei konstanter Drahtvorschubgeschwindigkeit bewirkt eine Steigerung der Stromstärke eine Verlängerung des Lichtbogens.

Bei allen variierten Drahtvorschubgeschwindigkeiten bis  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  bilden sich bei niedrigen Stromstärken kurze und bei hohen Stromstärken deutlich längere Lichtbögen aus. Die Analyse des Lichtbogens und des Werkstoffüberganges wird nachfolgend durch eine Gegenüberstellung der  $U/I$ -Verläufe und den Momentaufnahmen des Werkstoffüberganges durchgeführt. Als Drahtvorschubgeschwindigkeit wird wie bei der CV-Kennlinie  $2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  mit einer Stromstärke von 650 A (Einstellwert) gewählt. Abbildung 5.3.2-20 zeigt zu diesem Schweißversuch einen Werkstoffübergang. Es ist zu erkennen, dass der Lichtbogenansatz etwas oberhalb der Blechoberfläche ist und beim Werkstoffübergang keine bzw. wenige Spritzer (helle Punkt auf Einzelbild) entstehen. In

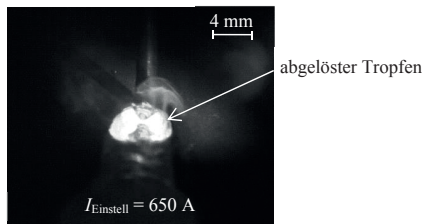


Abbildung 5.3.2-20: Einzelbild der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CC-Kennlinie,  $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$   
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Abbildung 5.3.2-21 ist der dazugehörige  $U/I$ -Verlauf dargestellt. Aus dem Diagramm werden der gleichmäßige Stromverlauf und die Auswirkungen der

Lichtbogenlängenänderung auf die Spannung deutlich. Da der Lichtbogen nicht unterhalb der Blechoberfläche brennt, bilden sich mittelgroße bis große Tropfen aus. Beim Werkstoffübergang kann es zum Kontakt mit dem Schmelzbad kommen. Im  $U/I$ -Verlauf (Abbildung 5.3.2-21) ist weiterhin zu sehen, dass es zu kurzschlussartigen Spannungsabfällen kommt ( $t \approx 0,075; 0,12; 0,27$  s).

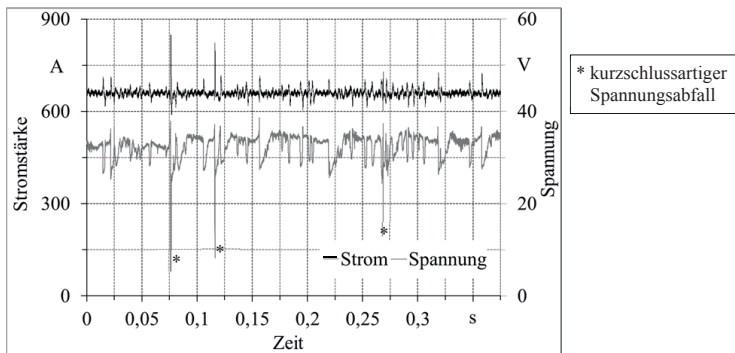


Abbildung 5.3.2-21:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie;  $I_{\text{Einstell}} = 650$  A  
 $v_d = 2,5$  m·min<sup>-1</sup>; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1

Zur Verlängerung des Lichtbogens erfolgte eine Erhöhung der Stromstärke auf 670 A und zur Verkürzung einer Senkung auf 630 A. Abbildung 5.3.2-22 zeigt Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der jeweiligen Lichtbögen. Bei 630 A stellt sich ein kurzer Lichtbogen ein, der unter der Blechoberfläche brennt (Abbildung 5.3.2-22 links). Der Tropfenübergang erfolgt feintropfig mit hoher Frequenz. Zu erkennen ist dies im  $U/I$ -Verlauf (Abbildung 5.3.2-23) an der Frequenz der Spannungsänderungen. Der Werkstoffübergang, der sich zu 90 % kurzschlussfrei ereignet, lässt nahezu keine Spritzer entstehen. In Abständen kommt es durch die Schmelzbadbewegung zum Kontakt des Schmelzbades mit dem schmelzflüssigen Elektrodenende. Die Tropfenablösung erfolgt dann unter einer explosionsartigen Auflösung der Werkstoffbrücke, begleitet von Spritzern.

Bei einer eingestellten Stromstärke von 670 A befindet sich der Lichtbogenansatz oberhalb der Blechoberfläche (Abbildung 5.3.2-22 rechts). Die Tropfengröße steigt gegenüber der geringeren Stromstärke an. Da die Abschmelzleistung gleich ist, sinkt die Ablösefrequenz. Im  $U/I$ -Verlauf (Abbildung 5.3.2-24) wird dies an den wenigen starken Ausschlägen in der Spannungskurve ersichtlich. Die Lichtbogenart wird als Langlichtbogen bestimmt. Mit der eingestellten Stromstärke von 670 A kommt es insgesamt zu einem unruhigeren Prozess-

verhalten und einer signifikant höheren Spritzerbildung (vgl. Abbildung 5.3.2-22).

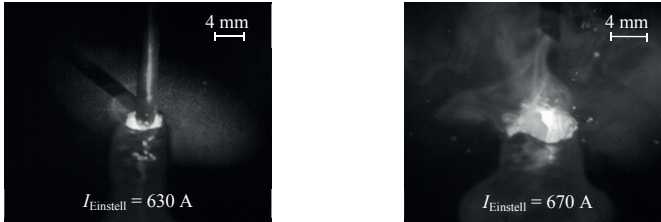


Abbildung 5.3.2-22: Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CC-Kennlinie,  $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$   
Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

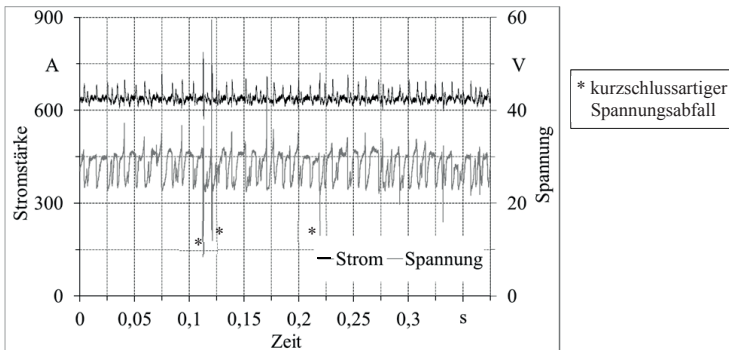


Abbildung 5.3.2-23:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie;  $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$   
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Die Zuordnung der Lichtbogenarten erfolgt wie bei der CV-Kennlinie. In Abbildung 5.3.2-25 sind die Bereiche der unterschiedlichen Lichtbogenarten skizziert. Die Schweißversuche mit CC-Charakteristik bestätigten die Feststellung, dass es beim MSG-Dickdraht-Schweißen zu keiner Ausbildung eines Kurzlichtbogens nach Definition kommt. Analog zur CV-Kennlinie stellt sich ein Übergangsbereich zwischen dem kurzen, unter der Blechoberfläche brennenden Lichtbogen und dem Langlichtbogen ein. Dieser Bereich existiert jedoch nur bei Drahtvorschubgeschwindigkeiten von  $2,0$  bis  $2,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und Spannungen zwischen  $26$  und  $35 \text{ V}$ . Durch geringere Spannungen erlischt der Lichtbogen. Ab einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  bewirkt eine Änderung zu geringeren Stromstärken (Spannung zwischen  $30$  und  $35 \text{ V}$ ),

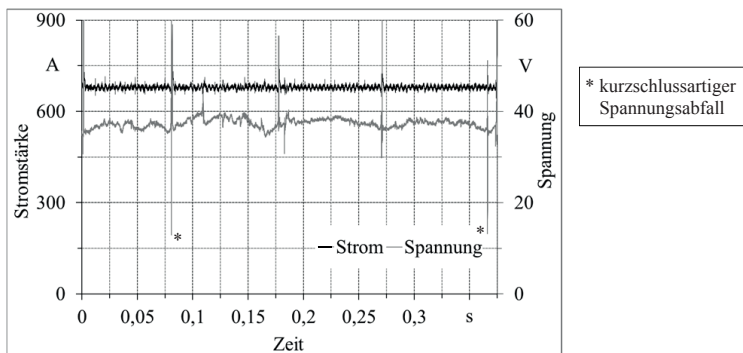


Abbildung 5.3.2-24:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie;  $I_{\text{Einstell}} = 670 \text{ A}$   
 $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

einen kurzschlussfreien, feintropfigen Werkstoffübergang mit hoher Tropfenfrequenz. Ab  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  brennt der Lichtbogen unabhängig von der eingestellten Stromstärke immer unterhalb der Blechoberfläche, wie es schematisch in Abbildung 5.3.2-10 links dargestellt ist. Die Lichtbogenart ändert sich ab dieser Drahtvorschubgeschwindigkeit nicht mehr. Der Bereich kann als „sprühlichtbogenartig“ bezeichnet werden. Bei hohen Stromstärken und Spannungen  $> 35 \text{ V}$  bildet sich ein Langlichtbogen aus. Dieser ist durch starke Spritzerbildung gekennzeichnet (siehe Abbildung 5.3.2-22 rechts). Beobachtet wird dieser Bereich ab  $555 \text{ A}$  ( $35 \text{ V}$ ) bei  $2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und bis  $910 \text{ A}$  ( $43 \text{ V}$ ) bei  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  Drahtvorschubgeschwindigkeit.

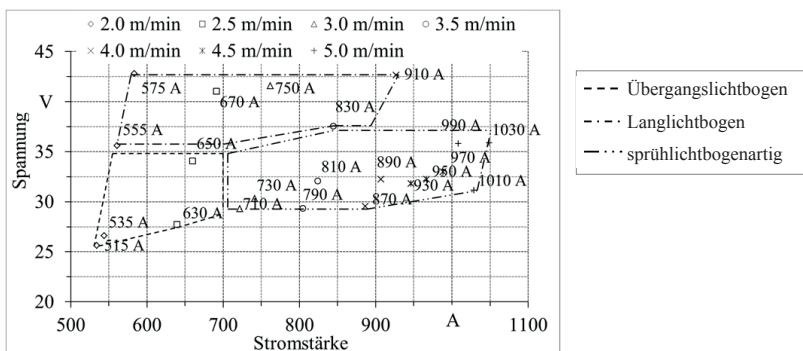


Abbildung 5.3.2-25: Bereiche der Lichtbögen im untersuchten Parameterfenster der CC-Kennlinie

Die Lichtbogenuntersuchung zur CC-Kennlinie mit Variation der Lichtbogenleistung hat gezeigt, dass eine Steigerung der Drahtvorschubgeschwindigkeit bis zu  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  möglich ist. Höhere Drahtvorschubgeschwindigkeiten führen zum „Schneid-Effekt“ (Abbildung 5.3.2-18). Mit der CC-Kennlinie kann somit prozessstabil eine maximale Abschmelzleistung von etwa  $15 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  erreicht werden. Je nach eingestellter Drahtvorschubgeschwindigkeit sind die einstellbaren Stromstärkewerte begrenzt. So ist z. B. beim Schweißen mit  $2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und 515 A der Lichtbogen zu kurz, hingegen bei 575 A zu lang. Dies führt zu einem unruhigen und instabilen Prozess.

Die Ergebnisse belegen, dass mit der eingesetzten Schweißmaschine sowohl die CV- als auch die CC-Kennlinie verwendbar ist. Aufgrund des Regelmechanismus bei einer Lichtbogenlängenänderung führt eine Tropfenablösung bei CV- zu einer Änderung der Stromstärke und bei CC-Kennlinie zu einer Änderung der Spannung. Im Verhältnis ist die Höhe der Spannungsänderung wesentlich geringer als die der Stromänderung. Dadurch sind die Leistungsschwankungen in allen Leistungsbereichen bei Verwendung der CC-Kennlinie geringer und der Prozess stabiler. Weiterhin zeigt sich, dass bei beiden Kennlinien ein kurzer Lichtbogen, der unter der Blechoberfläche brennt, vorteilhaft ist. Ein kurzer Lichtbogen hat eine geringere Spritzerbildung und eine reduzierte Schmelzbadbewegung zur Folge. Dies trägt zur wesentlichen Verbesserung sowohl der Reproduzierbarkeit als auch der Stabilität des Prozesses bei. Ein langer Lichtbogen, der über der Blechoberfläche am Drahtelektrodenende ansetzt, führt zum „Schneid-Effekt“ des Grundwerkstoffes. Die Ursache hierfür ist der hohe Lichtbogendruck, der das Schmelzbad entgegen der Schweißrichtung verdrängt.

Die Variation der Lichtbogenlängen beim MSG-Dickdraht-Schweißen ist im Vergleich zum UP-Schweißen aufgrund der oben genannten Erkenntnisse in einem geringeren Umfang möglich. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass der MSG-Dickdraht-Prozess deutlich anfälliger auf Prozessstörgrößen reagiert als der „robuste“ UP-Prozess. Durch die fehlende Kaverne und Schlackenschicht sind die Schmelzbadbewegungen beim MSG-Dickdraht-Prozess größer. Minimale Unstetigkeit im Drahtvorschub oder in der Schweißbewegung führen zu nicht akzeptablen Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Form von Poren, Einbrandkerben und Flankenbindefehlern.

Die vom MSG-Schweißen mit Drahtelektroden durchmessern  $< 2,4 \text{ mm}$  bekannten Kurzlichtbögen lassen sich beim MSG-Dickdraht-Schweißen mit der verwendeten Schweißmaschine nicht realisieren. Bei einem kurzschlussartigen Spannungsabfall regelt die Schweißmaschine je nach eingestellter Kennlinie entweder die Stromstärke oder die Spannung nach, sodass die Spannung nicht auf den Wert 0 V abfällt. Somit existiert beim MSG-Dickdraht-Schweißen auch kein Übergangslichtbogen im klassischen Sinne. Die anwendbare Lichtbogenart



beim MSG-Dickdraht-Schweißen ist vergleichbar mit dem Hochleistungskurzlichtbogen.

### 5.3.3 Schutzgas

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen von Änderung der Schutzgaszusammensetzungen auf den Werkstoffübergang erläutert. Variiert wird schrittweise der Anteil an Ar gegenüber dem Trägergas  $\text{CO}_2$ . Gegenstand der Untersuchungen sind Prozessmerkmale der Lichtbogenausbildung.

#### Konstant-Spannungs-Kennlinie

Die Schweißversuche der CV-Kennlinie erfolgten mit einer eingestellten Spannung von 38 V. In Abbildung 5.3.3-1 ist der Einfluss verschiedener Schutzgase (Zumischung von Ar (0, 25, 50, 82 %) in das Trägergas  $\text{CO}_2$ ) auf die Stromstärke und Spannung dargestellt. Die im Diagramm eingezeichneten Stromstärke- und Spannungswerte entsprechen den arithmetischen Mittelwerten einer Messung mit einer Dauer von 2 s. Weiterhin sind im Diagramm die Standardabweichungen (Stabw) von Stromstärke und Spannung, den entsprechenden Messungen zugeordnet. Im Diagramm wird aus den Stabw der Spannung ersichtlich, dass diese von der Schweißmaschine relativ konstant gehalten wird. Die maximale Stabw beträgt 3,7 V bei der Schweißung mit reinem  $\text{CO}_2$ . Die Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen die auftretenden Lichtbögen. Die Ionisationsenergie von Ar liegt bei etwa 15,8 eV. Da das molekulare  $\text{CO}_2$  zunächst dissoziiert werden muss, ergibt sich die Energie zur Erzeugung des Lichtbogenplasmas aus der Summe der Dissoziation (etwa 4,3 eV) und Ionisation (etwa 14,4 eV) und ist somit höher als die bei Ar. Untersuchungen in [NN14] ergaben, dass bei Verwendung von Ar-haltigen Schutzgasen eine Zumischung von  $\text{CO}_2$  den Metaldampfanteil im Lichtbogen erhöht. Die Autoren schreiben dem Metaldampf den größten Einfluss auf die Lichtbogeneigenschaften zu. Mit der Erhöhung des Metaldampfanteils (Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Plasmas) und der hohen volumetrischen Enthalpie sowie der größeren elektrischen Leitfähigkeit des  $\text{CO}_2$  kann die Senkung der Stromstärke bei Steigerung des  $\text{CO}_2$ -Anteils im Ar begründet werden (Verlauf der Stromstärke von rechts nach links im Diagramm der Abbildung 5.3.3-1). Da die Drahtvorschubgeschwindigkeit bei diesen Versuchen gleich blieb, nimmt die Länge des Lichtbogens aufgrund des fallenden Verlaufes der Stromstärke bei Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Anteils im Ar ab. Ein Vergleich der Lichtbogenarten ist bei der Variation der Schutzgaszusammensetzung schwierig, da sich bei der verwendeten Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und bis 50 % Ar-Anteil ein Lichtbogen bildet, der im Übergangsbereich zwischen Lang- und Sprühlichtbogen liegt. Bei höheren Ar-Gehalten ab 82 % bis hin zu reinem Ar ist ein strahlartiger, feintropfiger Werkstoffübergang ohne kurz

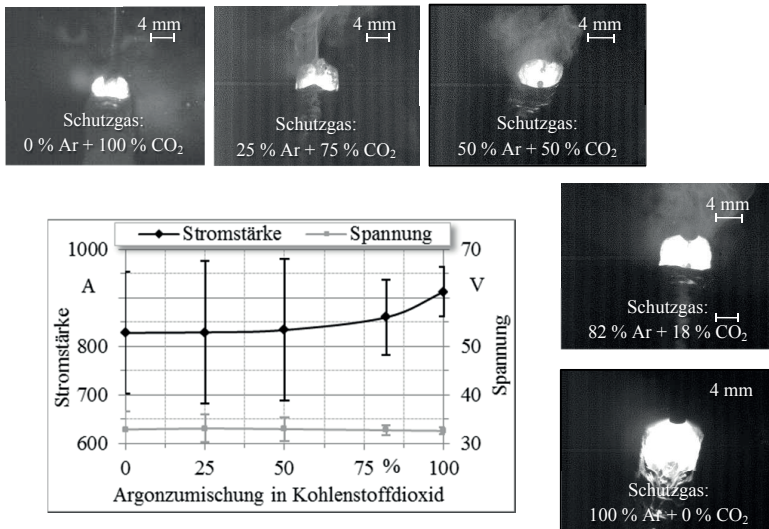


Abbildung 5.3.3-1: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogenbildung beim Schweißen mit CV-Kennlinie  
Oben und rechts: Einzelbilder des Lichtbogens,  
Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung

schlussartige Spannungsabfälle im Sprühlichtbogen festzustellen (Abbildung 5.3.3-2). Interessant ist, dass durch die hohen Stromstärken und dem strahlartigen Werkstoffübergang unter reinem Ar Ansätze eines Rotationslichtbogens zu beobachten (Abbildung 5.3.3-3) sind. Durch diesen feintropfigen Werkstoffübergang ist die Schwankung der Stromstärke gegenüber einem grobtropfigen Werkstoffübergang geringer. Deutlich wird dieser Sachverhalt beim Vergleich der Standardabweichungen der Stromstärke (Abbildung 5.3.3-1) der Schweißung mit 25 % Ar ( $\text{Stabw}_{25} = 147 \text{ A}$ ) und mit 82 % Ar ( $\text{Stabw}_{82} = 78 \text{ A}$ ) sowie 100 % Ar ( $\text{Stabw}_{100} = 51 \text{ A}$ ).

Beim MSG-Schweißen mit höheren Schweißleistungen und Drahtelektroden-durchmessern  $< 2,4 \text{ mm}$  führen Ar-Anteile über 75 % zu einem Lichtbogen, der das Drahtende umschließt. Der Tropfenübergang findet dabei sprühregenartig statt. Hingegen zeigte sich beim MSG-Dickdraht-Schweißen, dass der Lichtbogen nicht das Drahtelektrodenende umschließt, sondern er setzt unabhängig von der Schutzgaszusammensetzung an der Unterseite der Elektrode an. Der Werkstoffübergang erfolgt unter bestimmten Voraussetzungen (Lichtbogen brennt unterhalb der Blechoberfläche) ebenfalls unabhängig von der Schutzgaszusammensetzung feintropfig.

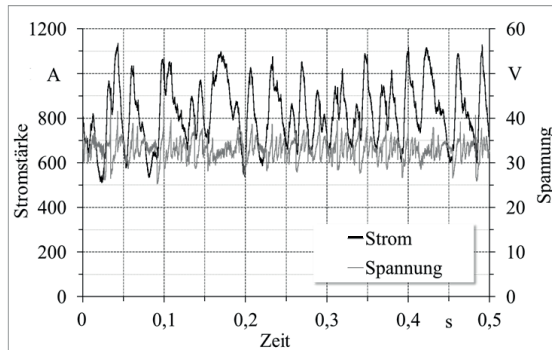


Abbildung 5.3.3-2:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ , Schutzgas M21  
 $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1

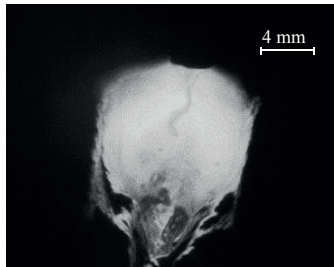


Abbildung 5.3.3-3: Rotationslichtbogen beim Schweißen mit CV-Kennlinie und Schutzgas I1

### Konstant-Strom-Kennlinie

Bei den Schweißversuchen zur Variation der Schutzgaszusammensetzung unter Verwendung der CC-Kennlinie wurden die Schutzgase wie oben beschrieben geändert, alle anderen Einstellgrößen wurden zur Vergleichbarkeit konstant gehalten. Abbildung 5.3.3-4 zeigt ein Diagramm mit den arithmetischen Mittelwerten von Stromstärke und Spannung sowie den Standardabweichungen aus jeweils einer Messung mit einer Messdauer von 2 s (Messsystem, Abtastrate siehe Kapitel 5.2). Es wird deutlich, dass mit einer Zumischung von Ar ins  $\text{CO}_2$  eine Verringerung der Spannung bei nahezu gleichbleibender Stromstärke einhergeht.

Die Senkung der Spannung führt zu einer stetigen Verkürzung der Lichtbogenlänge, sodass ab 50 % Ar der Lichtbogen tief unter der Blechoberfläche brennt und die Tropfenablösung nicht oder kaum zu sehen ist (siehe Abbildung

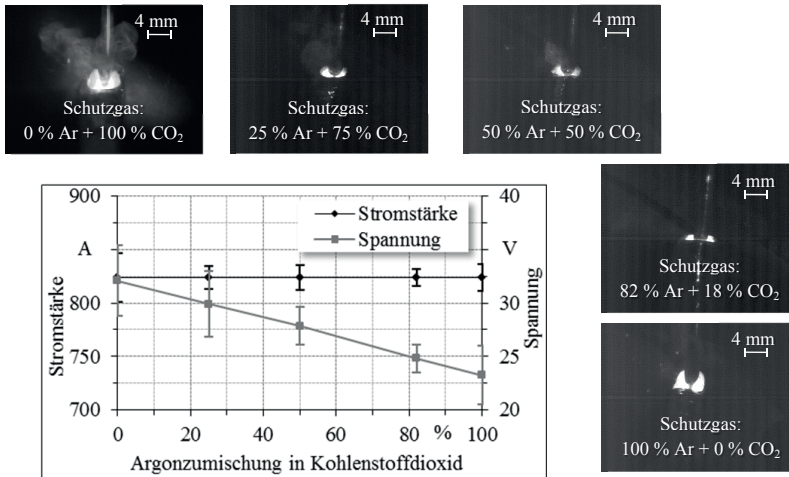


Abbildung 5.3.3-4: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogensbildung beim Schweißen mit CC-Kennlinie  
Oben und rechts: Einzelbilder des Lichtbogens  
Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung

Abbildung 5.3.3-5). Um gleiche Lichtbogenlängen einzustellen müsste die Stromstärke erhöht werden. Diese würde zum gleichen Verlauf von Stromstärke und Spannung führen wie bei Verwendung der CV-Kennlinie.

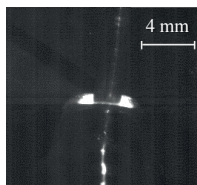


Abbildung 5.3.3-5: Kurzer Lichtbogen beim Schweißen mit CC-Kennlinie und Schutzgas M21

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit der Schutzgaszusammensetzung zwar die Schweißleistungswerte ändern, der Werkstoffübergang aber nur unwesentlich beeinflusst wird. Feintropfige Werkstoffübergänge finden sowohl mit reinem CO<sub>2</sub> als auch mit Ar statt. Der Haupteinfluss auf den Werkstoffübergang wird wie in Kapitel 5.3.2 erläutert der Schweißleistung bzw. der eingestellten Lichtbogenlänge zugeschrieben. Da für hohe Prozessstabilität und Minimierung von Schweißspritzern kurze, unterhalb der Blechoberfläche brennende Lichtbögen

verwendet werden sollten ist davon auszugehen, dass die Lichtbogenatmosphäre metaldampfdominiert ist und daher der Einfluss des Schutzgases auf die Tropfenbildung als gering angesehen werden kann.

### 5.3.4 Brennerabstand

Der Brennerabstand ist als Distanz zwischen Kontaktdüse und Werkstück definiert (Abbildung 5.3.4-1). Die Variation erfolgte sowohl für die CV- als auch die CC-Kennlinie. Die Untersuchungen wurden bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  durchgeführt. Bei der CV-Kennlinie wurde eine Spannung von 38 V und bei der CC-Kennlinie eine Stromstärke von 810 A eingestellt. Der Brennerabstand wurde ausgehend von einem Bezugswert (30 mm) in 10 mm Schritten soweit erhöht bzw. verringert, bis die Prozessgrenzen erreicht wurden.

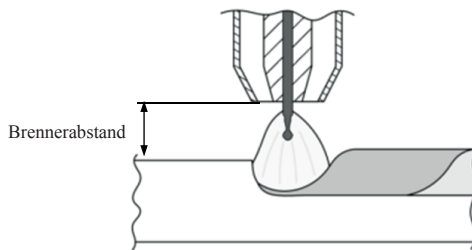


Abbildung 5.3.4-1: Distanz zwischen Kontaktdüse und Werkstück (Brennerabstand)

#### Konstant-Spannungs-Kennlinie

Wird bei der CV-Kennlinie der Brennerabstand verändert, kommt es zu einer Anpassung der Stromstärke (Abbildung 5.3.4-2). Durch eine Änderung des Brennerabstandes von 30 auf 70 mm ergibt sich aufgrund des höheren Spannungsabfalls im freien Drahtende eine größere Vorwärmung des Drahtes. Da der heißere Draht mit einer geringeren Stromstärke schmilzt, muss die eingestellte Stromstärke um etwa 25 % von 860 auf 650 A verringert werden. Zum einen führt dies zu einer Reduzierung der Schweißleistung und zum anderen zu einer drastischen Senkung der Energieeinbringung ins Bauteil.

Aufgrund des Versuchsaufbaues (Position Kamera – Brenner) sind Brennerabstände bis minimal 10 mm beobachtbar. Bei 10 mm Stick-out erfolgt der Werkstoffübergang feintropfig in einem kurzen Lichtbogen ohne kurzschlussartige Spannungsabfälle. Abbildung 5.3.4-3 zeigt dazu einen  $U/I$ -Verlauf. Aufgrund der geringen Entfernung von Brenner und Werkstück kommt es zu einer sehr hohen thermischen Belastung des Schweißbrenners. Weiterhin ist eine starke

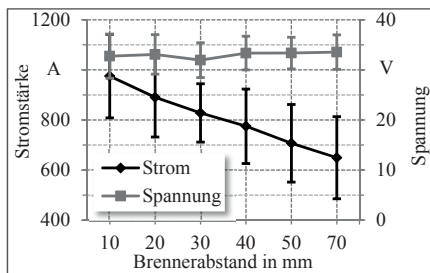
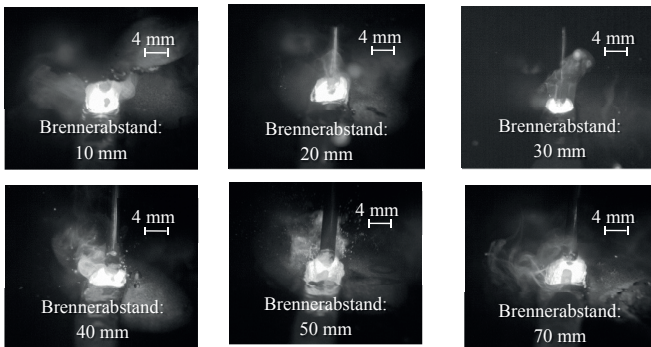


Abbildung 5.3.4-2: Einfluss des Brennerabstandes auf die Lichtbogenbildung beim Schweißen mit CV-Kennlinie  
Oben: Einzelbilder des Lichtbogens,  
Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung

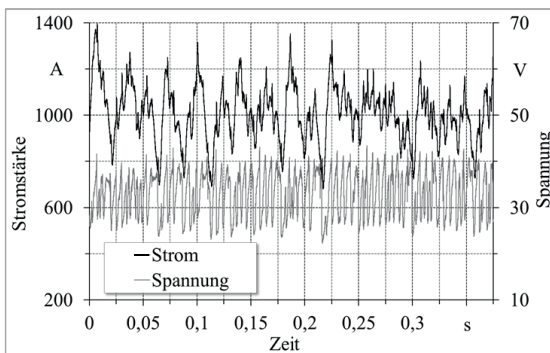


Abbildung 5.3.4-3:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ; Brennerabstand 10 mm  
 $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

Spritzerbildung zu verzeichnen. Dies wirkt sich negativ aus, da die Spritzer die Schutzgasdüse zusetzen.

Ab 20 mm freier Drahtlänge stellen die Spritzer kein Problem mehr für die Schutzgasdüse dar. Jedoch treten kurzschlussartige Abfälle der Spannung auf. Bei einer Erhöhung des Brennerabstandes auf 30 mm geht der Werkstoff mit mittelgroßen Tropfen in das Schmelzbad über. Wird der Kontaktrahabstand weiter erhöht, steigt durch die höhere Widerstandserwärmung im Draht die Länge des Lichtbogens an. Bei freien Drahtlängen von 50 mm sowie 70 mm erfolgt der Werkstoffübergang mit großen Tropfen unter einem Langlichtbogen.

Abbildung 5.3.4-4 zeigt dazu einen Vergleich zwischen 10 mm (links) und 70 mm (rechts) Brennerabstand. Während bei einem kleinen Stick-out der Lichtbogen tief im Blech brennt, befindet sich der Lichtbogenansatz bei 70 mm deutlich außerhalb.

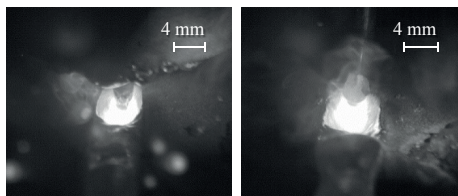


Abbildung 5.3.4-4: Lichtbogensausbildung bei einem Stick-out von 10 mm (links) und 70 mm (rechts)

Das Prozessverhalten wird sowohl für den kleinsten als auch für die beiden größten (50 und 70 mm) freien Drahtlängen als ungeeignet eingeschätzt. Die Tropfenablösung erfolgt jeweils unter einer starken Spritzerbildung. Hinsichtlich der Prozesssicherheit und -reproduzierbarkeit sind für die CV-Kennlinie Kontaktrahabstände zwischen 20 und 40 mm empfehlenswert. Mit einem Stick-out von 40 mm ist damit die höchste Abschmelzleistung möglich. Eine Erhöhung des Stick-outs führt zur Steigerung der Abschmelzleistung. Diese findet beim UP-Schweißen Anwendung [LUK01]. Beim konventionellen MSG-Schweißen mit Drahtelektrorendurchmessern  $< 2,4$  mm wird eine Änderung des Stick-outs nicht zur Steigerung der Abschmelzleistung genutzt, denn durch den erhöhten Spannungsabfall erfolgt ein Erweichen des Drahtes und führt zur Prozessinstabilität.

#### Konstant-Strom-Kennlinie

Der Brennerabstand hat einen wesentlichen Einfluss auf die Lichtbogenlänge bei Verwendung der CC-Kennlinie. Der lineare Zusammenhang zwischen Stick-out und Widerstand des freien Drahtendes ist in Abbildung 5.3.4-5 dar-

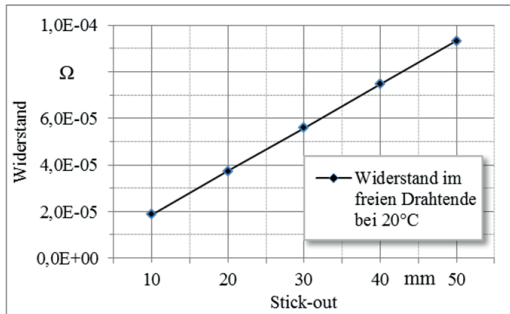


Abbildung 5.3.4-5: Zusammenhang zwischen Widerstand im freien Drahtende und Stick-out

gestellt. Die Berechnung ist theoretisch und stark vereinfacht, da eine konstante Temperatur von 20 °C angenommen wurde. Die Schweißmaschine hält die Stromstärke konstant. Aufgrund des OHM'schen Gesetzes ändert sich die Spannung. Dadurch wirkt sich eine Vergrößerung des Brennerabstandes bei gleich eingestellter Stromstärke deutlich auf die Lichtbogenlänge aus. In Abbildung 5.3.4-6 ist dieser Sachverhalt zu sehen. Im Diagramm sind die arithmetischen Mittelwerte der Stromstärke und Spannung sowie die Standardabweichungen eingetragen. Weiterhin sind Einzelbilder der Lichtbögen zu den Stick-outs von 20, 30 und 50 mm dargestellt.

Bei einem Brennerabstand von 10 mm ist der Schweißprozess instabil. Aufgrund der zu geringen Erwärmung des Drahtes reicht die Energie nicht aus, um die Lichtbogenstrecke zu ionisieren und den Zusatzwerkstoff aufzuschmelzen. Folglich erlischt der Lichtbogen und die Drahtelektrode wird durch Widerstandserwärmung ohne Lichtbogen abgeschmolzen. Auch bei 20 mm Stick-out ist der Lichtbogen so kurz, dass er tief im Blech brennt und sich der Tropfenübergang nicht beobachten lässt. Während beim Brennerabstand von 30 mm ein stabiler und sicherer Schweißprozess mit feintropfigem Werkstoffübergang vorliegt, führt eine Steigerung auf 40 mm zu einer Erhöhung der Lichtbogenspannung von 32 auf 48 V und einer Vergrößerung der Lichtbogenlänge. Bei weiterer Erhöhung des Brennerabstandes auf 50 mm ergibt sich ein so langer Lichtbogen, der den oben beschriebenen „Schneid-Effekt“ hervorruft.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass zur Erhöhung der Abschmelzleistung eine Vergrößerung des Brennerabstandes bei der CC-Kennlinie nicht prozesssicher durchgeführt werden kann. Dem gegenüber kann bei der CV-Kennlinie mit einem Kontaktrahabstand von bis zu 80 mm gearbeitet werden. Die besten Schweißergebnisse wurden bei beiden Kennlinien mit einem Stick-out von 30 mm erzielt.



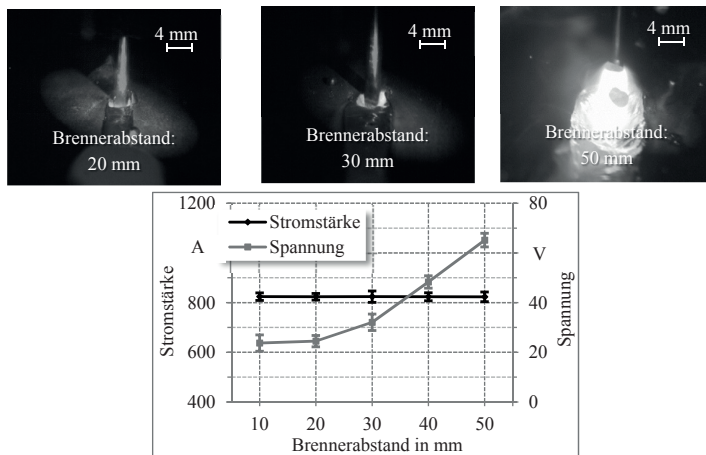


Abbildung 5.3.4-6: Einfluss des Brennerabstandes auf die Lichtbogensausbildung beim Schweißen mit CC-Kennlinie  
 Oben: Einzelbilder des Lichtbogens,  
 Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung

### 5.3.5 Charakteristik der Schweißmaschine

Aus der Abbildung 5.3.5-1 wird ersichtlich, dass beim Schweißen mit CV-Kennlinie und einer Drahtfördergeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  Schwankung der Stromstärke infolge der  $\Delta I$ -Regelung auftreten. Hingegen führt eine Änderung der Lichtbogenlänge beim Schweißen CC-Kennlinie zu einer Spannungsanpassung (Abbildung 5.3.5-2). Bei in etwa gleicher durchschnittlicher Schweißleistung ergibt sich mit der CC-Kennlinie eine geringere Leistungsschwankung (Abbildung 5.3.5-3), was eine deutlich höhere Prozessstabilität bewirkt. Die Häufigkeit von Schweißspritzern nimmt ab. Dadurch können höhere Schweißleistungen bzw. Drahtvorschubgeschwindigkeiten (bis  $4,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) realisiert werden.

Die Zumischung von Ar ins  $\text{CO}_2$  wirkt sich bei den beiden Kennlinien unterschiedlich aus. Unter CV-Charakteristik zeigte sich, dass mit zunehmenden Ar-Gehalten die Stromstärke ansteigt (vgl. Abbildung 5.3.3-1). Hingegen kam es bei der CC-Kennlinie zu einem Absinken der Spannung (vgl. Abbildung 5.3.3-4). Wie beschrieben, liegt die Ursache in den unterschiedlichen Metaldampfanteilen und Ionisationsenergien des Ar sowie des  $\text{CO}_2$ . Es konnte festgestellt werden, dass sich durch hohe Ar-Zumischungen keine Vorteile in Bezug auf den Werkstoffübergang sowie die Prozessstabilität erzielen lassen.

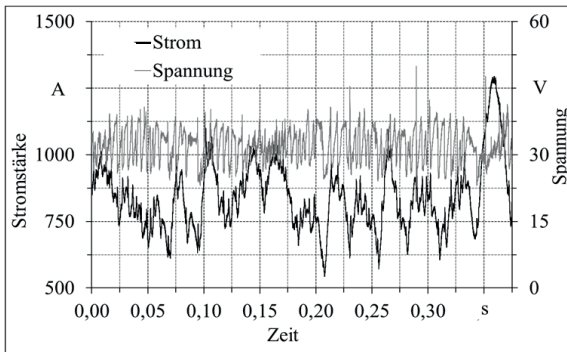


Abbildung 5.3.5-1:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie;  $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$   
 $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

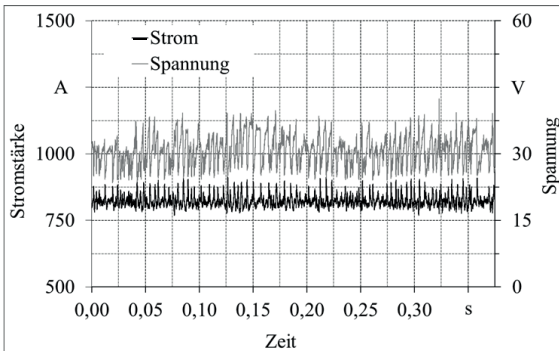


Abbildung 5.3.5-2:  $U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie;  $I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$   
 $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1, Schutzgas C1

Die Änderung des Kontaktrahabstandes zieht eine Lichtbogenlängenänderung nach sich. Ein positiver Effekt konnte durch die Brennerabstandsveränderung nur bei der CV-Kennlinie erreicht werden. Dort führt eine Erhöhung des Brennerabstandes zu einer Reduktion der benötigten elektrischen Leistung. Bei Verwendung der CC-Kennlinie wirken sich geringe Änderungen des Brennerabstandes stark auf die Lichtbogenlänge aus. Eine Variation des Brennerabstandes ist daher nur in Zusammenhang mit der Anpassung der elektrischen Parameter möglich.

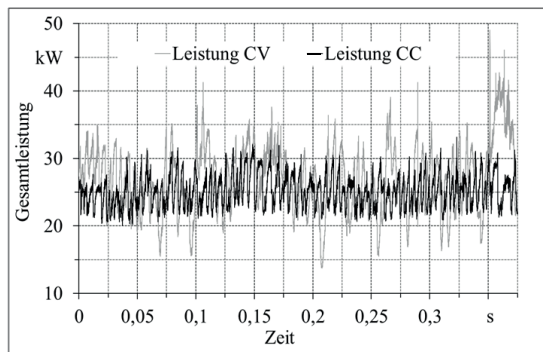


Abbildung 5.3.5-3: Leistungsvergleich zwischen CV- ( $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ) und CC-Kennlinie ( $I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$ )  
 $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1

## 5.4 Schweißnahtgeometrie

### 5.4.1 Versuchsparameter

Die im Kapitel 5.3 aufgeführte Prozessanalyse ist notwendig, um die Einflussfaktoren zur Lichtbogenausbildung herauszustellen und die Prozessgrenzen festzulegen. Jedoch gibt die alleinige Kenntnis des MSG-Dickdraht-Prozesses noch keine Aussage über die sich ausbildende Schweißnaht und deren Qualität. Daher sind Versuche erforderlich, die eine Beurteilung und Bewertung der Qualität der Schweißverbindung zulässt. Zur Erzeugung von Schweißverbindungen sind die Einflussfaktoren, die sich auf die äußere und innere Schweißnahtgeometrie auswirken von grundlegender Bedeutung. Dafür wurden folgende Prozessgrößen variiert: Schweißleistung, Schweißgeschwindigkeit, Schutzgaszusammensetzung, Kontaktrabstand und Brennerstellung.

Im Kapitel 5.3 wurden bereits die technologischen Prozessgrenzen aufgeführt und es zeigte sich, dass mit einer CC-Kennlinie ein wesentlich stabilerer Prozess möglich ist. Deshalb erfolgen die Versuche zur Schweißnahtgeometrie mit Konstant-Strom-Charakteristik (CC). Die Tabelle 5.4.1-1 gibt eine Übersicht über die Versuchsmatrix. Die darin gezeigten Prozessgrößen wurden systematisch geändert und deren Einfluss herausgestellt. Es resultiert ein zu untersuchendes Parameterfeld von etwa 50 Einschweißversuchen. Zu allen Schweißungen wurden Querschliffe erstellt und die Schweißnaht vermessen.

Tabelle 5.4.1-1: Versuchsmatrix zur Schweißnahtausbildung

Variation Drahtelektrode	$d_d = 3,2\text{ mm}$			$d_d = 4,0\text{ mm}$		
Variation Drahtvorschub [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	2,0	2,5	3,0	1,4	1,8	2,2
Variation Licht- bogenlänge	$I_{G\text{ min}}(540\text{ A})$ $< I_{G\text{ ref}} <$ $I_{G\text{ max}}(725\text{ A})$			$I_{G\text{ min}}(640\text{ A})$ $< I_{G\text{ ref}} <$ $I_{G\text{ max}}(910\text{ A})$		
Variation Schutzgas	0...100 % Ar in CO <sub>2</sub>					
Variation Schweißgeschw.	$v_{S\text{min}}(60\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}) < v_{S\text{ref}} < v_{S\text{max}}$ (160 cm·min <sup>-1</sup> )					
Variation Kon- taktrohr- abstand	$KA_{\text{min}}(10\text{ mm}) < KA_{\text{ref}} < KA_{\text{max}}(70\text{ mm})$					
Variation Bren- nerstellung	Schleppend			Stechend		
	$\varphi_{\text{min}}(0^\circ) < \varphi_{\text{ref}} < \varphi_{\text{max}}(15^\circ)$					

5.4.2 Schutzgas

Wie in Kapitel 5.3 erläutert, muss zur Erzeugung eines stabilen Prozesses ein sehr kurzer Lichtbogen, der unterhalb der Blechoberfläche brennt, eingestellt werden. Zu lange Lichtbögen führen dazu, dass das Schweißgut aus dem Nahtbereich verdrängt wird. Bei richtig gewählten elektrischen Parametern stellt sich für reines CO<sub>2</sub> als Schutzgas eine ausreichende Prozessstabilität ein. Bei Zumischung von Ar muss die Schweißleistung erhöht werden, was wiederum Einfluss auf Schmelzbadbewegung, Einbrandtiefe und -kerben hat. Bei Ar-Gehalten von bis zu 30 % im CO<sub>2</sub> sind die Schweißleistungswerte in etwa gleich (Vgl. Abbildung 5.3.3-1 und Abbildung 5.3.3-4). Um den Einfluss auf die innere Schweißnahtgeometrie zu ermitteln, werden im Folgenden Schweißungen mit unterschiedlicher Schutzgaszusammensetzung (0, 10, 20, 30 % Ar im CO<sub>2</sub>) vorgestellt. In Abbildung 5.4.2-1 sind dazu Schweißungen ( $v_d = 1,8\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) mit einer 4,0 mm Elektrode dargestellt. Es fällt auf, dass bei der Schweißung mit 30 % Ar der Einbrand geringer ist als bei Verwendung von reinem CO<sub>2</sub>. Die Querschliffe (Abbildung 5.4.2-2) der Schweißungen mit höherer Drahtvorschubgeschwindigkeit ( $v_d = 2,2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) zeigen diese Erscheinung nicht. Zurückzuführen ist die Schwankung der Einschweißtiefe auf die nicht statistisch abgesicherten Messungen.

Beim Vergleich der beiden Diagramme wird ersichtlich, dass mit steigender Stromstärke bzw. Drahtvorschubgeschwindigkeit der Einbrand bei gleicher Schweißgeschwindigkeit zunimmt. Die von UP-Schweißen bekannte Faust-

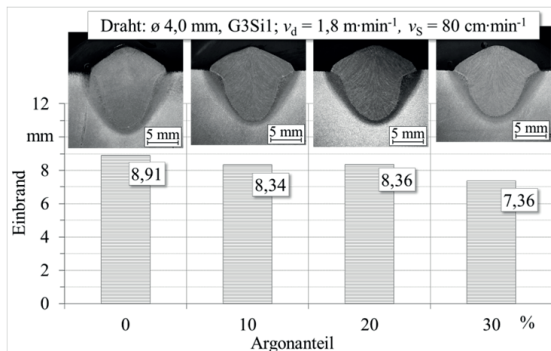


Abbildung 5.4.2-1: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Nahtausbildung,  $v_d = 1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

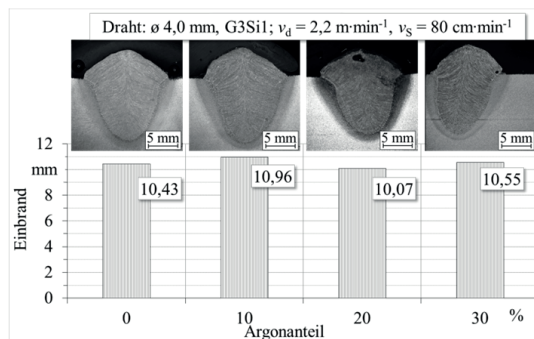


Abbildung 5.4.2-2: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Nahtausbildung,  $v_d = 2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

formel, dass 100 A in etwa 1 mm Einschweißtiefe entspricht, kann auch hier angewendet werden. Die Schweißversuche zum Einfluss des Schutzgases mit der 3,2 mm Drahtelektrode bestätigen die Aussage.

### 5.4.3 Schweißleistung

Eine der wesentlichsten Einflussgrößen auf die Einschweißtiefe ist die Stromstärke und die daraus resultierende Stromdichte. Die Einbrandform (innere Schweißnahtgeometrie) gestaltet sich bei Erhöhung der Stromstärke schmäler. Abbildung 5.4.3-1 und Abbildung 5.4.3-2 zeigen diesen Einfluss bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $80 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ . In Abbildung 5.4.3-1 sind Querschliffe sowie die Einschweißiefen von Schweißungen mit der 3,2 mm Elekt-

rode dargestellt. In Abbildung 5.4.3-2 sind die entsprechenden Bilder und Werte für die 4,0 mm Elektrode zu entnehmen. Erwartungsgemäß, steigt bei beiden Elektroden mit einer Erhöhung der Drahtvorschubgeschwindigkeit (Stromstärke) die Einschweißtiefe. Gleichzeitig nehmen die Nahtbreite ab und die Nahtüberhöhung zu.

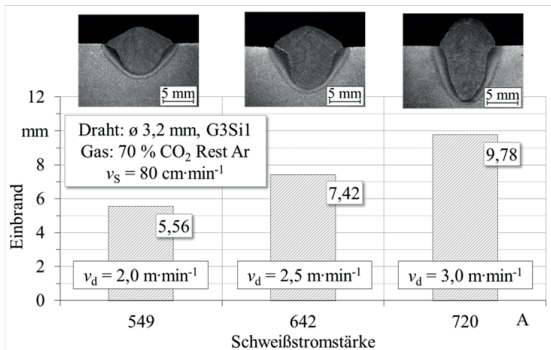


Abbildung 5.4.3-1: Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung, Drahtdurchmesser 3,2 mm

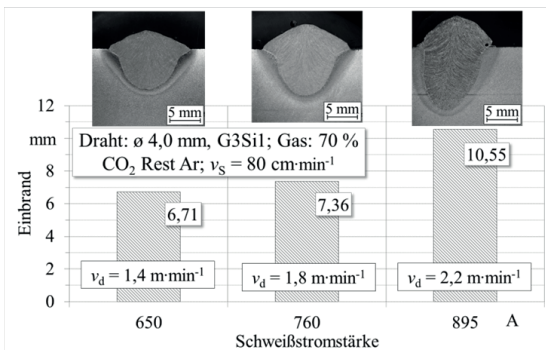


Abbildung 5.4.3-2: Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung, Drahtdurchmesser 4,0 mm

Es sind tiefe Einbrände ( $v/p < 1$ , Vgl. Kapitel 2.1.3) möglich. Jedoch ist zu beachten, dass wie beim UP-Schweißen ein Nahtbreite/-tiefe-Verhältnis von  $\geq 1$  eingehalten werden sollte, um Mittelrippendefekte und Lunker zu vermeiden. Eine Einbrandform wie rechts in Abbildung 5.4.3-1 ( $v_d = 3,0 \text{ m·min}^{-1}$ ) und Abbildung 5.4.3-2 ( $v_d = 2,2 \text{ m·min}^{-1}$ ) sind daher nicht zu empfehlen. Dadurch sind die max. Stromstärken bei der 3,2 mm Elektrode auf etwa 650 A begrenzt.

Dies entspricht einer Abschmelzleistung von  $9,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . Dagegen kann die 4,0 mm Elektrode bei Einhaltung von  $w/p < 1$  mit etwa 760 A abgeschmolzen werden. Damit ist eine Erhöhung der Abschmelzleistung um 12,6 % auf  $10,7 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  gegenüber der „dünnere“ Elektrode möglich.

Die proportionale Abhängigkeit zwischen Stromstärke und Einbrand ist bei beiden Elektrodendurchmessern festzustellen und auf die Erhöhung der Streckenenergie (Vgl. Gleichung (11)) bei Steigerung der Stromstärke zurückzuführen. Vom konventionellen MSG- und UP-Schweißen ist diese Abhängigkeit bekannt.

Beim Vergleich der Schweißungen mit unterschiedlichen Drahtdurchmessern und annähernd gleichen Stromstärken (Abbildung 5.4.3-1 Mitte: Ø 3,2 mm,  $v_d = 2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $I = 642 \text{ A}$  mit Abbildung 5.4.3-2 links: Ø 4,0 mm,  $v_d = 1,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $I = 650 \text{ A}$ ) kann festgestellt werden, dass aufgrund der höheren Stromdichte ein tieferer Einbrand mit der „dünnere“ Elektroden erreicht wird.

#### 5.4.4 Schweißgeschwindigkeit

Beim UP-Schweißen hat die Schweißgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Schweißnahtgeometrie. So führt eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit zu einer Reduzierung der Nahtbreite und zu einer Vergrößerung der Nahtüberhöhung. Die Einschweißtiefe nimmt bis zu einer bestimmten Schweißgeschwindigkeit zu. Die Ursache hierfür ist, dass der Lichtbogen auf dem schmelzflüssigen Schweißbad brennt und dadurch keinen tiefen Einbrand erzeugt. Bei einer optimalen, höheren Schweißgeschwindigkeit läuft der Lichtbogen dem Schmelzbad voraus und die Einschweißtiefe erreicht ein Maximum. Danach sinkt der Einbrand aufgrund der Senkung der Streckenenergie wieder. Dabei sind beim UP-Schweißen je nach Drahtdurchmesser und Schweißleistung Nahtbreiten von über 30 mm und Einschweißiefen von bis zu 10 mm realisierbar.

Zur Ermittlung des Einflusses der Schweißgeschwindigkeit wurden verschiedene Drahtvorschubgeschwindigkeiten (3,2 mm Elektrode:  $v_d = 2,0$ ; 2,5;  $3,0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  und 4,0 mm Elektrode:  $v_d = 1,4$ ; 1,8;  $2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) bei unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten ( $v_s = 60, 80, 120, 160 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) untersucht.

Die Abbildung 5.4.4-1 zeigt den Einfluss der Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit von 80 auf  $120 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  beim MSG-Dickdraht-Schweißen mit der 4,0 mm Elektrode. Eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit um  $40 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  führt beim Schweißen mit  $I = 648,8 \text{ A}$  zu einer Senkung der Einschweißtiefe von etwa 2 mm. Dieser Effekt ist auch bei höherer Stromstärken und kleineren Drahtdurchmessern festzustellen. Die Ergebnisse zeigen einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit und Ein-

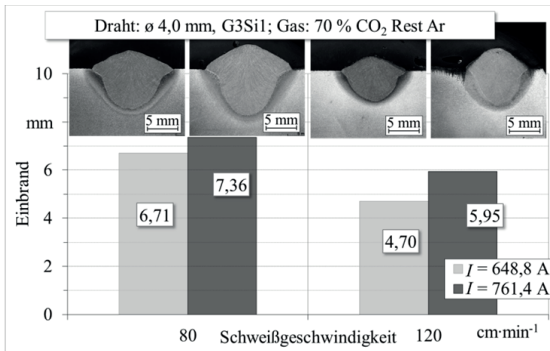


Abbildung 5.4.4-1: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf den Einbrand bei verschiedenen Stromstärken, Drahtdurchmesser 4,0 mm

schweißtiefe. Dieser Sachverhalt tritt ebenfalls beim UP-Schweißen auf. Bei Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit nimmt die Nahtbreite und die Nahtüberhöhung ab.

Die Beeinflussung der Nahtbreite in so großen Bereichen, wie es beim UP-Schweißen möglich ist, kann beim MSG-Dickdraht-Schweißen nicht realisiert werden. Schweißgeschwindigkeiten von  $v_s < 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  führen aufgrund von Turbulenzen im Schmelzbad zu nicht tolerierbaren Nahtunregelmäßigkeiten (z. B. Poren), Schweißspritzern und Prozessinstabilitäten. Prozesssicher sind Schweißgeschwindigkeiten von bis zu  $120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  möglich. Dadurch sind Nahtbreiten beim MSG-Dickdraht-Schweißen mit einer 4,0 mm Drahtelektrode zwischen 10 mm ( $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) und 18 mm ( $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) erreichbar.

#### 5.4.5 Brennerstellung

##### Einfluss des Kontaktrohrabstandes

Wie bereits in Kapitel 5.3.4 erwähnt, kann der Kontaktrohrabstand bei gleich eingestellten elektrischen Parametern nur in gewissen Bereichen verändert werden. Bei der Verwendung einer CC-Kennlinie ließ sich aufgrund der sich einstellenden hohen Lichtbogenspannungen keine sinnvolle Steigerung der Abschmelzleistung realisieren. Deshalb wurden für die Einbrandversuche die Brennerabstände von 30 mm (Abbildung 5.4.5-1 links) und 50 mm (Abbildung 5.4.5-1 rechts) mit der CV-Kennlinie geschweißt und verglichen. Dazu wurde die 4,0 mm Drahtelektrode und ein Mischgas aus 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$  verwendet. Die eingestellte Spannung bei der gewählten Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  lag bei 32 V, sodass sich ein kurzer, unter der Blechoberfläche brennender Lichtbogen ergab.



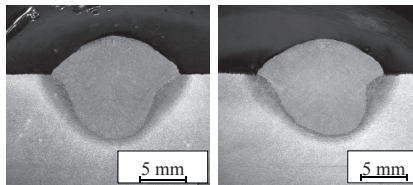


Abbildung 5.4.5-1: Einfluss des Stick-outs bei Schweißungen mit CV-Kennlinie,  
 $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$   
 $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 %  
 Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 links: Brennerabstand 30 mm, rechts: Brennerabstand 50 mm

Die metallographische Auswertung der Schweißnähte zeigt, dass es keine wesentlichen Unterschiede in der inneren und äußeren Nahtformung gibt, sodass gesagt werden kann, dass eine Erhöhung des Stick-outs um 20 mm (von 30 auf 50 mm) keinen Einfluss auf die Nahausbildung hat. Aus Kapitel 5.3.4 geht hervor, dass mit dem Parameter des Brennerabstandes eine drastische Senkung der sich einstellenden Stromstärke einhergeht. Da sich die Schweißnaht aber kaum durch den Brennerabstand ändert, eröffnet sich die Möglichkeit, den Wärmeinput durch Vergrößerung des Stick-outs bei gleicher Schweißnahtgeometrie zu senken.

#### Einfluss der Brennerneigung

Beim konventionellen MSG-Schweißen hat die Brennerstellung einen großen Einfluss auf die Schweißnahtgeometrie. So ergibt sich bei stechender eine geringere und bei schleppender Brennerstellung eine größere Einschweißtiefe. Aufgrund der hohen Stromdichten beim UP-Schweißen ist hier der Einfluss der Brennerneigung gering. Zur Klärung des Einflusses beim MSG-Dickdraht-Schweißen wurde der Brenner schleppend und stechend um  $5^\circ$  und  $15^\circ$  geneigt. Anwendung fand eine 4,0 mm Drahtelektrode und ein Schutzgas aus 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ . An der Schweißmaschine wurden die CC-Kennlinie, ein Drahtvorschubgeschwindigkeit von  $1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  und eine Stromstärke von 765 A eingestellt.

Die Neigung des Brenners um  $5^\circ$  hat bei schleppender und bei stechender Stellung keinen signifikanten Einfluss auf den Einbrand (siehe Abbildung 5.4.5-2 mittlere Balken). Bei  $15^\circ$  ist eine leichte Abnahme der Einschweißtiefe zu verzeichnen (schleppend 1 mm, stechend 0,5 mm). Die schleppend geschweißte Naht ist geringfügig schmaler und höher als die stechend geschweißte.

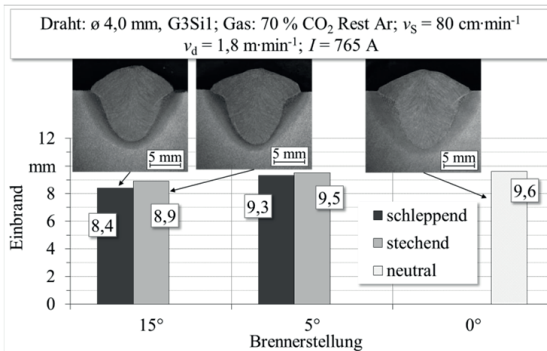


Abbildung 5.4.5-2: Einfluss der Brennerneigung auf den Einbrand

#### 5.4.6 Drahtelektrorendurchmesser

Beim Vergleich der Einschweißiefen, die mit Schweißungen gleicher Streckenenergien und unterschiedlichen Elektrorendurchmessern erzeugt werden, ist festzustellen, dass mit dünneren Drahtelektroden ein tieferer Einbrand erreicht wird (Vgl. Abbildung 5.4.3-1 und Abbildung 5.4.3-2). Der tiefere Einbrand beim Schweißen mit „dünnen“ Drähten wird durch die höhere Stromdichte erzeugt. Die Steigerung der Streckenenergie ist, wie bereits in den Kapiteln 5.3.2 und 5.4.4 erwähnt, einerseits durch die Strombelastbarkeit der Elektrode und andererseits durch die Schweißgeschwindigkeit begrenzt. Da die 4,0 mm Elektrode höher strombelastbar ist, lässt sich diese mit größeren Stromstärken verschweißen. Somit ist in Summe mit einem größeren Durchmesser auch ein tieferer Einbrand möglich. Diese Gegebenheit tritt auch beim UP-Schweißen ein.

Die Widerstandserwärmung im „dünnen“ Draht ist gegenüber einem größeren Durchmesser höher. Dies resultiert in einer höheren Abschmelzleistung. Im Diagramm der Abbildung 5.4.6-1 ist der Zusammenhang für die 3,2 mm und 4,0 mm Elektrode dargestellt. Die Kurven zeigen einen Bereich der Stromstärke zwischen 650 und 730 A. Die Steigerung der Abschmelzleistung durch Erhöhung der Stromdichte wird beim konventionellen MSG- und beim UP-Schweißen mit Fülldrähten genutzt.

Durch die Untersuchungen wird deutlich, dass mit der 3,2 mm Elektrode bei gleicher Schweißstromstärke bis maximal 700 A aufgrund der größeren Stromdichte eine höhere Abschmelzleistung bis etwa  $11 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  und ein tieferer Einbrand erzeugt werden kann. Die Auswahl des Drahtelektrorendurchmessers muss also in Abhängigkeit der zu fügenden Blechdicken und der gewählten Nahtvorbereitung erfolgen.

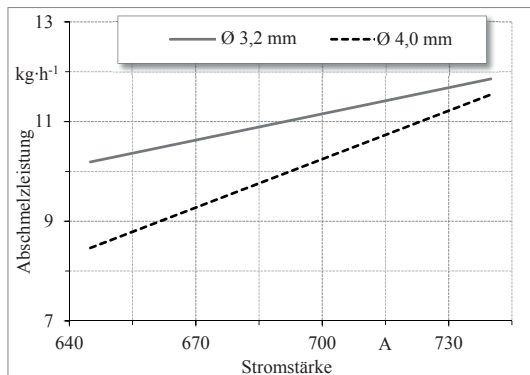


Abbildung 5.4.6-1: Abschmelzleistung in Abhängigkeit der Stromstärke

## 5.5 Schweißverbindungen

### 5.5.1 Versuchssparameter

Da das MSG-Dickdraht-Schweißen zum Fügen von Blechen ab einer Blechdicke von 10 mm verwendet werden soll, empfiehlt die ISO 9692-2 Schweißnahtvorbereitung. Die empfohlenen Nahtvorbereitungen für größere Blechdicken sind beispielsweise Y-, DY- oder X-Nähte. Die Lichtbogenverhältnisse beim Schweißen solcher Nähte sind aber gegenüber Auftragschweißungen unterschiedlich, da der Lichtbogen auf den Nahtflanken brennt. Dies führt zur Senkung des Einbrandes. Zur Erzeugung einer anforderungsgerechten Schweißnaht ist es erforderlich eine Durchschweißung mit Wurzelbildung oder eine Überschneidung von mindestens 1 mm bei Schweißungen in Lage/Gegenlage-Technik zu realisieren. Um die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 und 5.4 in die Schweißnahtvorbereitung einfließen zu lassen, wurden für Stumpfstoße die gleichen Prozessparameter, wie bei den Auftragschweißungen, eingesetzt. Bei den Schweißverbindungen kam aufgrund des stabileren und spritzerärmeren Prozesses die CC-Kennlinie zum Einsatz. Als Zusatzwerkstoff wurden Elektroden der Güte G3Si1 mit den Durchmessern 3,2 und 4,0 mm verwendet. Das Schutzgas setzte sich aus 70 % CO<sub>2</sub> Rest Ar zusammen. Der Volumenstrom des Schutzgases war 100 l·min<sup>-1</sup>. Bei den stumpf aneinander gestoßen Blechen wurde der Brenner in einem neutralen Anstellwinkel und einem Abstand von 30 mm geführt. Die Tabelle 5.5.1-1 beinhaltet die für die Versuche eingestellten Parameter des Schweißprozesses. Diese sind die Drahtvorschubgeschwindigkeit und die Schweißgeschwindigkeit. Weiterhin wurde die

Tabelle 5.5.1-1: Versuchsmatrix zu den Schweißverbindungen

Variation Drahtvorschubgeschwindigkeit $v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]		1,4	1,8	2,2
Variation Schweißgeschwindigkeit $v_s$ [cm·min <sup>-1</sup> ]		60	80	120
<b>Stumpf- Stoß</b>	Nahtöffnungswinkel $\alpha$ [°]	$\alpha = 30; 45; 60; 90$		
	Fugentiefe $c$ [mm]	$c = f(b, s, \alpha, MR, v_d, v_s)$		

mechanisch bearbeitete Nahtvorbereitung variiert. Dafür wurden der Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  und die Steghöhen  $b$  bzw. die Fugentiefe  $c$  (siehe Abbildung 5.5.2-1) geändert. Darüber hinaus wurden verschiedene Blechdicken ( $t = 12, 15, 20$  mm) verschweißt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wurden die Versuche mit Blechen der Güte S355J2+N durchgeführt.

### 5.5.2 Schweißnahtvorbereitung

#### Einseitige einlagige Schweißungen

Ausgehend von der Zielstellung Bleche von einer Seite in einer Lage zu verbinden, wurden Y-Nähte, wie in Abbildung 5.5.2-1 schematisch dargestellt, vorbereitet. Die Nahtvorbereitung erfolgte dabei in Anlehnung an ISO 9692-2. Dabei bestand insbesondere die Notwendigkeit, die Fugengeometrie so zu wählen, dass der Steg ohne Durchbrand und in vollem Umfang aufgeschmolzen wird. Weiterhin war zu beachten, dass der Querschnitt der Fuge durch den Zusatzwerkstoff vollständig gefüllt wird und sich eine geringe Nahtüberhöhung ausbildet.

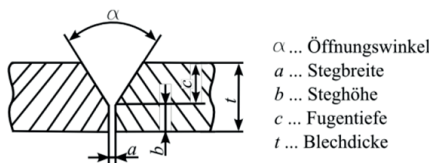


Abbildung 5.5.2-1: Nahtgeometrie einer einseitig ausgeführten Schweißnaht

Die in Kapitel 5.4 ermittelten Einschweißiefen und Querschnitte der Nahtüberhöhung dienen als Grundlageninformation zur Dimensionierung der Nahtgeometrie. Die Steghöhe  $b$  (Abbildung 5.5.2-1) wurde in Abhängigkeit der erwarteten Einschweißiefe zunächst empirisch dimensioniert. Der Stegabstand  $a$  wurde auf einen technischen Null-Spalt festgelegt. Eine Querschnittsberechnung der Fuge erfolgte über den Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  und die Fugentiefe  $c$ . Aus diesen Überlegungen wurde deutlich, dass in Abhängigkeit der Schweißparameter verschiedene Blechdicken in einer Lage miteinander ver-

bunden werden können. Für eine hinreichend gute Ausprägung der Naht existiert zwischen einer ungenügenden Wurzelausbildung und dem Auftreten von Durchbrand nur ein schmaler Bereich. Daher wurde für jede Streckenenergie eine angepasste Nahtgeometrie festgelegt.

Die ersten Schweißversuche zeigten, dass sich die Einschweißiefen in Abhängigkeit des Nahtöffnungswinkels  $a$  (siehe Kapitel 5.5.3) und der Fugentiefe  $c$  (siehe Kapitel 5.5.4) gegenüber den Auftragschweißungen unterscheiden. In Abbildung 5.5.2-2 links ist eine Naht mit ungenügender Durchschweißung zu sehen. Diese wurde mit der 4,0 mm Elektrode und den Schweißparameter  $I = 880 \text{ A}$  ( $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) und  $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  an einem 12 mm dicken Blech hergestellt. Vorbereitet wurde ein Nahtöffnungswinkel  $a$  von  $30^\circ$  sowie eine Steghöhe  $c$  von 5 mm (schematisch in Abbildung 5.5.2-2 links dargestellt). Nach den ersten Versuchen zeigte sich, dass die Einschweißtiefe im Vergleich zu den Auftragschweißungen zunimmt, jedoch der Steg nicht in vollem Umfang erfasst werden konnte. Durch eine Steigerung der Streckenenergie, die über eine Senkung der Schweißgeschwindigkeit auf  $80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  realisiert wurde, konnte eine Durchschweißung erreicht werden. Abbildung 5.5.2-2 rechts zeigt den Querschliff der Probe, welche im Vergleich zur Abbildung 5.5.2-2 links mit identischer Blechdicke, Nahtvorbereitung und Schweißleistung eine Durchschweißung aufweist.

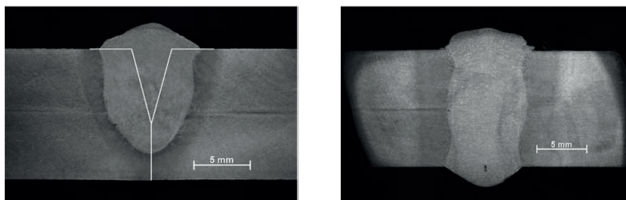


Abbildung 5.5.2-2: Einseitig ausgeführte Schweißnähte; links: ohne, rechts: mit Durchschweißung

Blech: S355J2+N,  $t = 12 \text{ mm}$   $a = 30^\circ$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ;

$I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1;

Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$

links:  $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , rechts:  $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

In weiteren Versuchsschweißungen wurden die Steghöhe  $b$  und Öffnungswinkel  $a$  iterativ so lange verändert, bis letztendlich passende Bedingungen eingegrenzt wurden, die eine Schweißung von einer Seite in einer Lage zulassen.

Die Ergebnisse belegen, dass ein einseitiges Schweißen aufgrund der hohen Schweißleistungen nicht immer sicher und ohne Wurzeldurchfall durchführbar ist. Eine Senkung der Stromstärke hat zur Folge, dass sich die Gefahr eines Durchbrandes verringert, kann aber zu einer ungenügenden Durchschweißung

führen. Abbildung 5.5.2-3 zeigt die Wurzelseite einer Schweißung mit ungenügender Durchschweißung. Darüber hinaus führt eine Reduzierung der Stromstärke zu einer geringeren Abschmelzleistung, sodass in zwei Lagen geschweißt werden muss, um das Nahtvolumen zu füllen. In Abbildung 5.5.2-4 ist eine Schweißung mit Wurzellage und Decklage zu sehen. Die Wurzel wurde mit einer Stromstärke von 620 A ( $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) und die Decklage mit 750 A ( $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) geschweißt, um ein „Durchfallen“ zu vermeiden.



Abbildung 5.5.2-3: Einseitig ausgeführte Schweißnaht mit ungenügender Durchschweißung  
 Blech: S355J2+N,  $t = 15 \text{ mm}$   $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 7 \text{ mm}$ ;  
 $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$

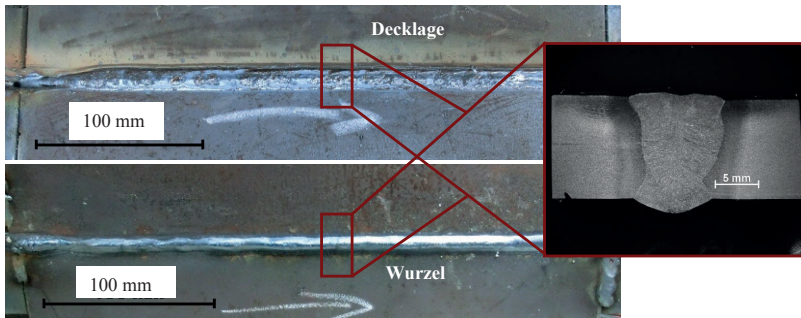


Abbildung 5.5.2-4: Einseitig in zwei Lagen ausgeführte Schweißnaht  
 Blech: S355J2+N,  $t = 12 \text{ mm}$   $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 3 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1;  
 Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 Decklage:  $I_{\text{Einstell}} = 750 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 Wurzel:  $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 70 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Ein einseitiges Schweißen ist prinzipiell möglich. Badsicherungen in Form von Pulverkissen o. Ä. sind dabei immer zu verwenden. In der Wurzellage sollte mit geringer Schweißleistung gearbeitet werden, um einen Wurzeldurchfall zu vermeiden. Im Vergleich zum MSG-Schweißen mit Drahtelektrodenndurchmesser  $< 2,4 \text{ mm}$  ist eine drastische Reduzierung der Lagenzahl möglich. Dabei sind

hohe Schweißgeschwindigkeiten (bis  $120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) bei tieferen Einbränden als beim UP-Schweißen erreichbar.

Grundlegende Voraussetzung für eine einseitige Schweißung ist die Einhaltung der Maßhaltigkeit aller Nahtgeometriegrößen und Vermeidung von Kantenversatz sowie ein stabil laufender Schweißprozess. Die Problematik der Wurzelbildung kann durch einen Technologiewechsel umgangen werden. Als Alternative besteht die Möglichkeit manuell vorher eine Wurzellage mit konventionellem MSG-Schweißen einzubringen oder von zwei Seiten in Lage/Gegenlage-Technik zu schweißen.

#### Lage/Gegenlage-Technik

Bei der Lage/Gegenlage-Technik wurde die Steghöhe  $b$  so gewählt, dass die Forderung von einer Lagenüberschneidung von etwa 2–3 mm erfüllt ist. Die Ermittlung der Abhängigkeit des Einbrandes von der Nahtvorbereitung erfolgte in den vorangegangenen Versuchen, sodass die DY-Nähte ebenfalls in Anlehnung an ISO 9692-2 gefertigt wurden. Abbildung 5.5.2-5 zeigt in einer Prinzipskizze den Querschnitt einer DY-Naht mit den relevanten Nahtgeometriegrößen. Der Stegabstand  $a$  war analog zu den einseitig ausgeführten Y-Nähten ein technischer Null-Spalt.

Bei Betrachtung der in Lage/Gegenlage-Technik geschweißten Proben, zeigen sich rein äußerlich keine Anzeichen von Nahtunregelmäßigkeiten (siehe Kapitel 6.2.1 und 6.2.2). In Abbildung 5.5.2-6 ist die Nahtoberfläche und ein Querschliff einer zweiseitig ausgeführten Schweißnaht dargestellt. Diese Nähte haben eine gleichmäßige Nahtoberfläche und weisen bei richtiger Dimensionierung der Fugen eine flache Nahtüberhöhung auf. Nahtunregelmäßigkeiten wie Einbrandkerben oder schroffe Nahtübergänge liegen im tolerierbaren Maß.

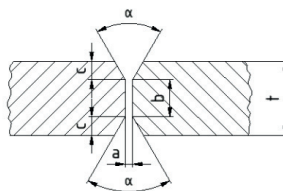


Abbildung 5.5.2-5: Nahtgeometrie einer zweiseitig ausgeführten Schweißnaht

Die in den Versuchen geschweißten Verbindungen sind an Blechdicken von 12, 15 und 20 mm hergestellt worden. Jedoch durch das Einbringen von einer Lage je Seite sind durchaus auch Blechstärken von theoretisch bis zu 30 mm in dieser Technik schweißbar.

Ergänzend zum Schweißen mit einer Lage je Seite war auch die Variante mit drei Lagen Gegenstand der Untersuchung. In einer ersten Ausführung wurde mit hoher Schweißgeschwindigkeit eine Heft- und Stützlage in der Mitte ge-



schweißt und anschließend von jeder Seite eine Lage zum Füllen der Naht ausgeführt. Ebenso wurde eine asymmetrische DY-Naht vorbereitet. Dabei wurde als erstes die Seite mit der kleineren Fuge mit hoher Schweißgeschwindigkeit als Badstütze geschweißt und danach die Gegenseite mit einer bzw. zwei Lagen gefüllt.

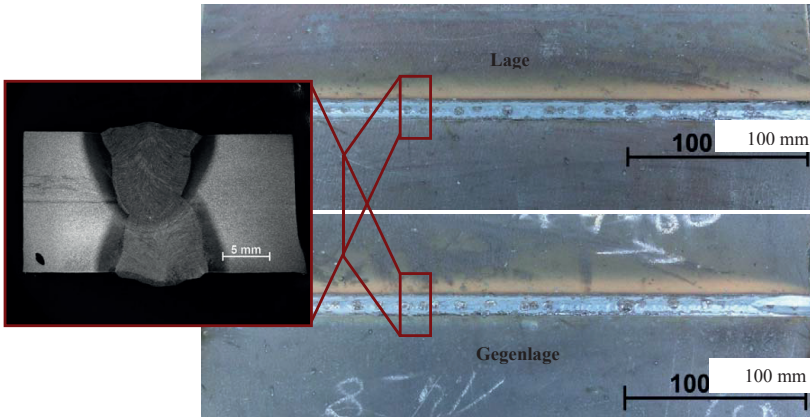


Abbildung 5.5.2-6: Zweiseitig ausgeführte Schweißnaht  
 Blech: S355J2+N,  $t = 12 \text{ mm}$   $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 4 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$   
 Lage und Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  
 $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

### 5.5.3 Nahtöffnungswinkel $\alpha$

Während der Versuche zu den Schweißnahtvorbereitungen zeigte sich, dass neben der Schweißleistung und -geschwindigkeit durch die Nahtvorbereitung weitere Einflussgrößen auf die Schweißnahtgeometrie bestehen. Der Vergleich der erreichten Einschweißtiefen bzw. die Höhe des vom Lichtbogen aufgeschmolzenen Steges verdeutlicht die Beobachtung, dass der Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  und die Fugentiefe  $\epsilon$  auf diese Nahtmerkmale einen Einfluss nehmen.

Zur Einstellung des Fugenquerschnitts wiesen die Nahtvorbereitungen bei den Schweißverbindungen jeweils einen Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  von 30, 45, 60 und 90° auf. Anhand der Schlitze lässt sich feststellen, dass mit größer werdendem Öffnungswinkel  $\alpha$  mehr vom Steg aufgeschmolzen wird. Die Gesamteinbrandtiefe bleibt hingegen vergleichbar groß.

Zur Erörterung der Vorgänge wird die Skizze in der Abbildung 5.5.3-1 herangezogen. Die Darstellung zeigt im Wesentlichen eine Y-Nahtvorbereitung mit



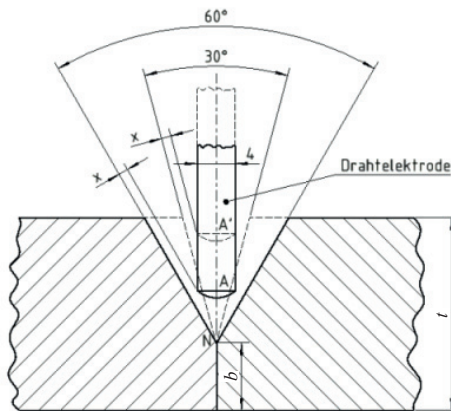


Abbildung 5.5.3-1: Lichtbogenansatz bezogen auf das Blech in Abhängigkeit der Nahtvorbereitung

zwei verschiedenen Öffnungswinkeln ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ) und das untere Ende der Drahtelektrode.

Unter der Voraussetzung, dass sich bei gleichen Parametern die gleiche Lichtbogenlänge einstellt, brennt der Lichtbogen auf dem kürzesten Weg zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff. Der Weg ist in der Skizze als Strecke  $x$  für den Winkel  $30^\circ$  und  $60^\circ$  angegeben. Die idealisierte Skizze vernachlässigt das sich aufgrund der Tropfenablösung und durch das Wandern des Lichtbogens der Abstand ändert. Eine Vergrößerung des Nahtöffnungswinkels von  $30^\circ$  auf  $60^\circ$  führt zu einer Verschiebung des Punktes  $A$  zu  $A'$ . Dies hat zur Folge, dass der Lichtbogen bei größerem Öffnungswinkel  $a$  tiefer im Blech brennt. Die Abbildung 5.5.3-2 bestätigt die anhand der Skizze (Abbildung 5.5.3-1) aufgestellten Überlegungen. Der Unterschied des aufgeschmolzenen Steges zwischen einer Nahtvorbereitung mit  $30^\circ$  bzw.  $60^\circ$  beträgt unter ansonsten gleichen verwendeten Schweißparametern mit 7,9 zu 3,4 mm mehr als das Doppelte. Wie bereits erwähnt bleibt die Gesamteinbrandtiefe in etwa gleich. Da die linke Schweißnaht (Abbildung 5.5.3-2) mit einer höheren Schweißgeschwindigkeit erzeugt wurde sinkt die Nahtüberhöhung um etwa 1 mm.

Der Öffnungswinkel  $a$  hat einen Einfluss auf das zu füllende Schweißnahtvolumen. Je kleiner der Winkel desto geringer das zu füllende Schweißnahtvolumen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden geringe Volumina gefordert. Da die Steghöhe  $b$ , die aufgeschmolzen wird, vom Nahtöffnungswinkel  $a$  abhängig ist, kann dieser nicht beliebig klein gestaltet werden.

Der Einfluss des Nahtöffnungswinkels  $a$  ist beim konventionellen MSG-

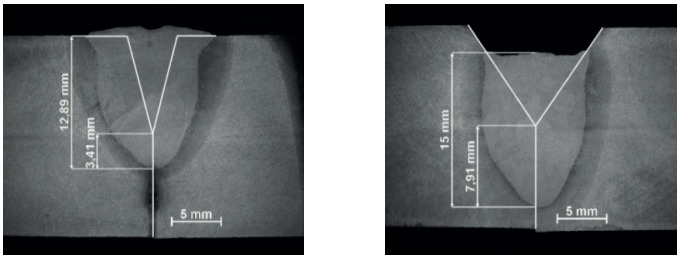


Abbildung 5.5.3-2: Einseitig ausgeführte Schweißnähte mit verschiedenen Einbränden abhängig vom Nahtöffnungswinkel  $a$   
 links:  $30^\circ$  und  $v_s = 90 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , rechts:  $60^\circ$  und  $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$   
 Blech: S355J2+N,  $t = 20 \text{ mm}$ ,  $a = 60^\circ$ ,  $b = 10 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Schweißen und UP-Schweißen ähnlich. Jedoch ist bei den wesentlich energieärmeren MSG-Lichtbögen mit Drahtdurchmessern  $< 2,4 \text{ mm}$  der Einfluss geringer. Beim UP-Schweißen wird ebenfalls die aufgeschmolzene Steghöhe  $b$  kleiner, umso kleiner der Nahtöffnungswinkel  $a$  ist. Des Weiteren besteht bei kleinen Nahtöffnungswinkeln die Gefahr von Flankenbindefehlern. Deshalb muss die Lichtbogenspannung, also die Lichtbogenlänge reduziert werden, damit der Lichtbogen nicht nur auf einer Nahtflanke, sondern auf beiden tief im Blech brennt.

#### 5.5.4 Fugentiefe $c$

Die zweite nahtvorbereitungsseitige Einflussgröße auf den Einbrand ist die Fugentiefe  $c$  (vgl. Abbildung 5.5.2-1 und Abbildung 5.5.2-5). Zusammen mit dem Nahtöffnungswinkel  $a$  ergibt sich daraus der Fugenquerschnitt. Die vorbereiteten Fugentiefen liegen bei den Y-Nähten zwischen 7...15 mm, bei den symmetrischen DY-Nähten zwischen 4...7 mm und bei den asymmetrischen zwischen 2...7 mm.

Zur Erläuterung der Auswirkungen wird ebenfalls die idealisierte Skizze (Abbildung 5.5.3-1) verwendet. Eine gedachte Vergrößerung oder Verkleinerung der Fugentiefe  $c$  bewirkt bei einem gleich bleibenden Nahtöffnungswinkel  $a$  eine Veränderung der Lage des Lichtbogenansatzpunktes  $A$  zur Blechoberfläche. Zur Bestätigung dient Abbildung 5.5.4-1. Darin sind zwei Querschliffe zu sehen, die jeweils eine Y-Naht mit einem Öffnungswinkel  $a$  von  $30^\circ$  aufweisen. Im rechten Bild der Abbildung 5.5.4-1 ist die vorbereitete Fugentiefe  $c$  0,7 mm größer als im linken Bild. Die Einschweißtiefe ist 1,54 mm tiefer als bei der Y-Naht mit der kleineren Fugentiefe  $c$ . Bezogen auf die aufgeschmolzene Steghöhe  $b$ , ergibt sich ein Unterschied von 0,68 mm.

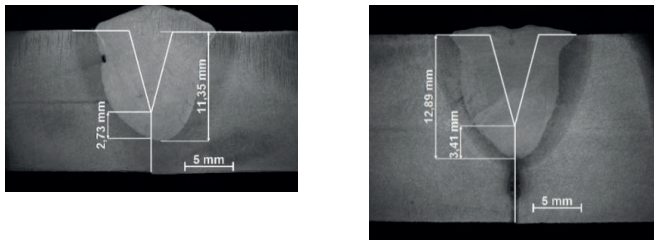


Abbildung 5.5.4-1: Einseitig ausgeführte Schweißnähte mit verschiedenen Einbränden abhängig von der Fugentiefe  $c$   
Blech: S355J2+N,  $a = 30^\circ$ ;  
Drahtelektrode  $\varnothing 4,0$  mm, G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 $I_{\text{Einstell}} = 880$  A,  $v_d = 2,2$  m·min<sup>-1</sup>  
links:  $t = 15$  mm,  $b = 6$  mm; rechts:  $t = 20$  mm,  $b = 10$  mm

Der Einfluss der Fugentiefe  $c$  auf die Einschweißtiefe ist abhängig vom Nahtöffnungswinkel  $a$ . Denn bei kleinen Öffnungswinkeln  $a$  brennt der Lichtbogen unabhängig von der Fugentiefe  $c$  aufgrund des Drahtelektrodendurchmessers von 4,0 mm nah der Blechoberfläche.

Abschließend lässt sich die Aussage treffen, dass der Einfluss der Fugentiefe  $c$  geringer ist als der des Öffnungswinkels  $a$ .

## 6 MSG-Dickdraht-Schweißen – Beurteilung und Bewertung der Schweißergebnisse

### 6.1 Allgemeines

Für den industriellen Einsatz des MSG-Dickdraht-Verfahrens ist die Beurteilung und Bewertung der Schweißverbindung von größter Bedeutung. Deshalb wurden an ausgewählten Schweißungen die folgenden zerstörungsfreien und zerstörenden Werkstoffprüfungen durchgeführt:

- Sichtprüfung
- Farbeindringprüfung
- Durchstrahlungsprüfung
- Metallographische Auswertung
- Chemische Analyse des Schweißgutes
- Zugprüfung
- Kerbschlagbiegeprüfung
- Härte nach Vickers

In Kapitel 5.5 wurde erwähnt, dass eine einseitige Einlagenschweißung nicht prozesssicher und reproduzierbar durchführbar ist. Deshalb werden hier nur Schweißungen bewertet, die in Lage/Gegenlage-Technik ausgeführt wurden. Die aus den Untersuchungen der Lichtbogenausbildung (Kapitel 5.3) erkannten Grenzen des Prozesses wurden genutzt, die elektrischen Parameter für die Schweißverbindungen mit der 4,0 mm Drahtelektrode der Güte G3Si1 festzulegen. Da sich das Mischgas aus 70 % CO<sub>2</sub> Rest Ar als besonders geeignet herausgestellt hat (Vgl. Kapitel 5.3.3), wurde dieses für die Erzeugung der zur bewertenden Schweißverbindungen eingesetzt. Durch die Untersuchungen in Kapitel 5.5 sind die Einflüsse der Nahtvorbereitung bekannt. Mit Hilfe der Ergebnisse wurde die in Tabelle 6.1-1 aufgeführte Versuchsmatrix zur Bewertung und Beurteilung der Schweißnahtqualität aufgestellt. Da die mechanisch-technologischen Gütewerte von der Wärmeeinbringung bzw. der Abkühlgeschwindigkeit abhängen, variiert bei den Schweißungen die Streckenenergie  $E$  von 9,2 bis 23 kJ·cm<sup>-1</sup>. Eingestellt wurde die Streckenenergie u. a. durch die Schweißgeschwindigkeit, die von minimal 60 bis maximal 130 cm·min<sup>-1</sup> reicht. Geschweißt wurden Bleche der Güte S355J2+N mit Dicken von 12, 15 und 20 mm. Als vorteilhaft hat sich ein Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  von mindestens 60°

Tabelle 6.1-1: Versuchsmatrix zu den Schweißverbindungen im Stumpfstoß

Proben- nr.	Prozessparameter					Nahtvorbereitung		
	$v_d$ [m·min <sup>-1</sup> ]	$v_s$ [cm·min <sup>-1</sup> ]	$I_{\text{mess}}$ [A]	$U_{\text{mess}}$ [V]	$E$ [kJ·cm <sup>-1</sup> ]	$t$ [mm]	$\alpha$ [°]	$b$ [mm]
112	2,2	L: 130 Gl: 120	895,6	34,3	L: 14,2 Gl: 15,4	20	60	8
113	1,8	L: 90 Gl: 80	761,4	28,6	L: 14,5 Gl: 16,3	20	60	6
114	1,4	60	~640	~29	~18,6	20	60	6
115	1,4	80	~635	~29	~13,8	15	60	5
116	1,4	120	~635	~29	~9,2	12	60	4
121	2,2	L: 90 Gl: 80	895,6	34,3	L: 20,7 Gl: 23,0	20	90	11
138	1,4	80	~635	~29	~13,8	15	60	5

ergeben, sodass Schweißnähte mit Nahtöffnungswinkeln von 60 und 90° gefertigt wurden. Da die aufschmelzende Steghöhe  $b$  mit der Streckenenergie variiert, wurden verschiedene Steghöhen ( $b = 4, 5, 6, 8, 11$  mm) vorbereitet.

## 6.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen

### 6.2.1 Sichtprüfung

Zur Beurteilung der Oberflächenunregelmäßigkeiten und Zuordnung in Bewertungsgruppen wurde die ISO 5817 herangezogen. Die Sichtprüfung wird in ISO 17637 geregelt. Darin sind die Bedingungen zusammengestellt, unter denen das Prüfverfahren allgemein abzulaufen hat. Da ausschließlich Schweißungen in Lage/Gegenlage-Technik in die Auswertung einbezogen wurden, werden keine Nahtwurzel betreffenden Merkmale angegeben. Dafür erfolgt eine separate Betrachtung von Lage und Gegenlage. In den Untersuchungen lag der Schwerpunkt auf der Prozessbeurteilung und nicht beim Zündverhalten sowie der Endkraterfüllung. Deshalb wurden während der Versuche diese Parameter an der Schweißmaschine nicht optimiert. Aus diesem Grund wird hier nicht auf die Kriterien Endkraterisse und Zündstellen eingegangen.

Aufgrund des energiereichen Lichtbogens kommt es zu einer hohen Schmelzbadbewegung, die dazu führt, dass die Schweißnähte rein äußerlich grob geschuppt sind. Weiterhin bilden sich auf der Nahtoberfläche Schlackenpartikel in Form von  $\text{SiO}_2$ .

Durch die groß gewählten Steghöhen bei den Schweißverbindungen kam es bei keiner Schweißung zu einem „Durchfall“ der Naht in der ersten Lage. Weiter-

hin traten keine Oberflächenrisse auf. Poren an der Nahtoberfläche konnten nicht festgestellt werden. Auch Bindefehler wurden bei keiner Schweißung detektiert. Einbrandkerben, die nicht in die Bewertungsgruppe B fallen, konnten ebenfalls nicht festgestellt werden. Eine zu gering kalkulierte Schweißgutmenge führte bei einzelnen Versuchen zu einer nicht ausreichend gefüllten Naht (Abbildung 6.2.1-1 rechts). Gleiches führte bei einigen weiteren Schweißnähten zu einer Decklagenunterwölbung (Abbildung 6.2.1-1 links). Diese Unregelmäßigkeit ist nach ISO 5817 als kurze Unregelmäßigkeit ( $< 25 \text{ mm}$ ) zulässig.

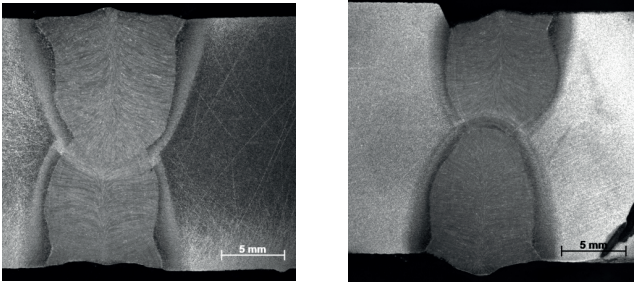


Abbildung 6.2.1-1: Schweißnaht mit Decklageunterwölbung (links) und nicht aufgeschmolzener Nahtflanke (rechts)

Blech: S355J2+N,  $t = 20 \text{ mm}$  DY-Naht,  $\alpha = 60^\circ$ ;

Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;

rechts:  $b = 6 \text{ mm}$

Lage:  $I_{\text{Einstell}} = 760 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_s = 90 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 760 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_s = 80 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

links:  $b = 8 \text{ mm}$ ;

Lage:  $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_s = 130 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_s = 120 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$

In Abbildung 6.2.1-2 ist eine Schweißung dargestellt, bei der alle Prüfungen für eine Verfahrensprüfung durchgeführt wurden. Die Länge des Probenbleches beträgt 1000 mm.

Die Sichtprüfung zeigt, dass die Parameter Drahtvorschubgeschwindigkeit, Stromstärke, Spannung und Schweißgeschwindigkeit anhand der Schweißnahtvorbereitung ausgewählt werden müssen. Wie in Kapitel 5.4.3 und 5.4.4 beschrieben, ist die Schweißnahtbreite in relativ geringem Maße veränderbar. Deshalb kann es bei zu geringer Abschmelzleistung bzw. zu hoher Schweißgeschwindigkeit zu Flankenbindefehlern kommen. Eine weitere Ursache für diese Unregelmäßigkeit sind zu große Nahtöffnungswinkel  $\alpha$  und eine zu hohe Fugentiefe  $c$ . Rein äußerlich lassen sich mit richtig eingestellten Parametern mit dem MSG-Dickdraht-Schweißen qualitativ hochwertige Schweißnähte ohne unzulässige Einbrandkerben und Nahtüberhöhungen erzeugen.

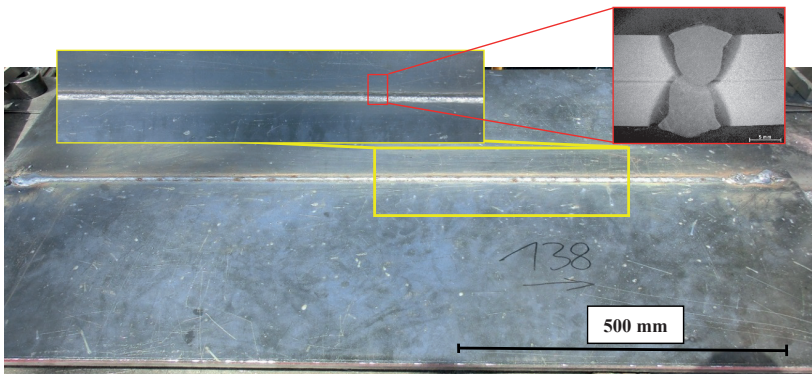


Abbildung 6.2.1-2: Schweißnaht für die Sichtprüfung  
 Blech: S355J2+N,  $t = 15 \text{ mm}$   $a = 60^\circ$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 Lage und Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

### 6.2.2 Farbeindringprüfung

Da Oberflächenporen meist nicht mit dem Auge erkennbar sind, wurde die Farbeindringprüfung durchgeführt. Weiterhin gehört nach ISO 15614-1 die Oberflächenrissprüfung, für die ein Prüfumfang von 100 % vorgeschrieben ist, zu den geforderten Untersuchungen. Die Prüfmethode (Eindring- oder Magnetpulverprüfung) spielt dabei keine Rolle. Oberflächige Schweißnahtunregelmäßigkeiten wie Risse, Bindefehler und Poren können mit diesem Verfahren erkannt werden.

Die Ergebnisse der Eindringprüfung zeigen, dass bis auf eine Probe alle Schweißnähte keine ermittelbaren Unregelmäßigkeiten aufweisen. Der gefundene Fehler (Oberflächenpore) kann aber wegen geringer Größe und Häufigkeit vernachlässigt werden.

Im Vergleich zum UP-Schweißen ist die Gefahr von Oberflächenporen beim MSG-Dickdraht-Schweißen aufgrund des fehlenden Schutzes des Schmelzbades und der erstarrenden Schweißnaht durch die Pulverschüttung wesentlich höher.

### 6.2.3 Durchstrahlungsprüfung

Für eine Beurteilung der Schweißnahtqualität werden sowohl äußeren als auch inneren Nahtunregelmäßigkeiten zur Bewertung herangezogen. Um inneren Unregelmäßigkeiten festzustellen, wurde die Durchstrahlungsprüfung verwen-



det. Die detektierbaren Unregelmäßigkeiten beim Röntgen einer Schweißnaht sind im Wesentlichen Risse, Bindefehler, Poren, Einschlüsse, Lunker und ungenügende Durchschweißungen, wobei die Sichtbarkeit der Unregelmäßigkeiten von deren Ausdehnung in Strahlungsrichtung abhängt. Die Durchstrahlungsprüfung erfolgte nach EN 1435 B. Die Unregelmäßigkeiten wurden nach ISO 5817 bewertet. Aus den Röntgenfilmen geht hervor, dass in einer Vielzahl von Probeschweißungen nicht tolerierbare Nahtunregelmäßigkeiten in Form von Poren/-nester auftraten. Bei den meisten der Schweißproben waren Poren die Ursache für die Nichterfüllung der Verfahrensprobe. Wie erwähnt sind wegen der hohen Schweißleistung die Schmelzbäder sehr groß. Da die Wärmequelle (Lichtbogen) relativ schnell über die Bauteiloberfläche bewegt wird, kann es dazu kommen, dass der Schmelze nicht genügend Zeit bleibt, um vor der Erstarrung vollständig zu entgasen, sodass Poren im Schweißgut verbleiben. Die Ursache dafür wurde in erster Linie in einer zu hohen Abkühlrate gesehen. Um diese zu verkleinern, erfolgte eine Vorwärmung der Probenbleche auf 150 °C (siehe Abbildung 6.2.3-1). Jedoch konnte dadurch die Porenbildung nicht reduziert werden.



Abbildung 6.2.3-1: Vorwärmung einer Schweißnaht (links) und Überprüfung der Vorwärmtemperatur (rechts)

Bei weiteren Schweißversuchen stellte sich heraus, dass es im kontinuierlichen Schweißprozess zu Störungen in der Drahtförderung durch "Stockungen" des Drahttransportes kam. Dieser diskontinuierliche Drahtvorschub führt zu Störungen des sensiblen Gesamtsystems (Lichtbogen – Elektrode – Grundwerkstoff – Schweißnaht). Kleinste Prozessinstabilitäten erzeugen nicht beherrschbare Schmelzbadbewegungen, die zu Gaseinschlüssen führen können. Zur prozesssicheren und störungsfreien Schweißung müssen daher alle Voraussetzungen für eine konstante Drahtförderung erfüllt sein. Dazu sind entsprechende Führungs- und Anpressrollen mit V-Nut notwendig. Auch eine nicht kontinuierliche Schweißbewegung erzeugt eine wellenförmige Schmelzbadbewegung, die letztendlich zu inneren Nahtunregelmäßigkeiten führen kann. Nach Verbesserungen im technischen Aufbau des Versuchstandes konnten Schweißungen ohne innere Nahtunregelmäßigkeiten erzeugt werden.



Abbildung 6.2.3-2 zeigt ein Röntgenaufnahme einer Schweißung, die alle Kriterien einer Verfahrensprobe erfüllt.

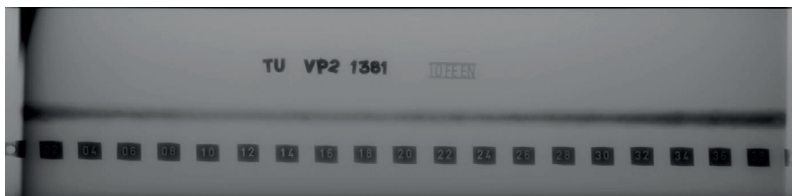


Abbildung 6.2.3-2: Röntgenfilm einer Schweißung (Lage/Gegenlage-Technik)  
 Blech: S355J2+N,  $t = 15 \text{ mm}$   $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 Lage und Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Beim UP-Schweißen werden Stromstärken in ähnlicher Größenordnung eingesetzt. Die Pulver- und Schlackenabdeckung des Schmelzbades sorgen für eine Abkühlgeschwindigkeit, die gegenüber dem MSG-Dickdraht-Schweißen wesentlich langsamer ist. Eine geringere Abkühlrate begünstigt die Entgasung des Schweißgutes. Die Schmelzbadgrößen der beiden Prozesse unterscheiden sich kaum. Durch die Ausbildung der Kaverne und der sich über die Schmelze legenden Schlacke ist die Schmelzbadbewegung beim UP-Schweißen bedeutend geringer. Diese Porenproblematik spielt beim UP-Schweißen eine untergeordnete Rolle. Es kann gesagt werden, dass der MSG-Dickdraht-Prozess in Hinsicht auf die Bildung von Poren im Schweißgut deutlich anfälliger ist.

## 6.3 Zerstörende Werkstoffprüfungen

### 6.3.1 Chemische Analyse des Schweißgutes

Die erreichbaren mechanisch-technologischen Gütewerte, insbesondere die Kerbschlagzähigkeit der Schweißnaht hängt wesentlich von der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes ab. Es ist zu erwarten, dass es beim MSG-Dickdraht-Schweißen zum Zu- und/oder Abbrand von Mn und Si kommt. Um die Abhängigkeit der Zu-/Abbrände der Legierungselemente in Folge der Schweißleistung herauszustellen, wurden zwei Proben analysiert, die einerseits mit geringer ( $E = 9,2 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) und andererseits mit hoher Streckenenergie ( $23 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) geschweißt wurden. In Tabelle 6.3.1 1 ist die chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode in der ersten Spalte angegeben. In den beiden anderen Spalten sind die des Schweißgutes ersichtlich.

Tabelle 6.3.1-1: Chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode G3Si1 und der mit verschiedenen Streckenenergien erzeugten Schweißgüter

Element	Draht Mass.-%	SG $E = 9,2$ $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$	SG $E = 23$ $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$
		Mass.-%	Mass.-%
C	0,09	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>
Si	0,87	<b>0,45</b>	<b>0,47</b>
Mn	1,48	<b>1,29</b>	<b>1,33</b>
P	0,011	0,013	0,015
S	0,017	0,011	0,018
Al	0,002	0,012	0,013
Cu	0,041	0,04	0,02
Cr	0,03	0,03	0,02
Ni	0,04	0,03	0,03
Mo	0	0,002	0,002
V	0,004	0,002	0,003
As	0	0,005	0,002
Ti	0,011	0,005	0,004
Co	0	0,003	0,004

Es zeigt sich, dass aufgrund der hohen Aufmischung mit dem Grundwerkstoff der Kohlenstoffgehalt im Schweißgut zunimmt und der Anteil der Legierungselemente Mn und Si abnimmt. Die Streckenenergie hat einen Einfluss auf das Abbrandverhalten. So brennt ein höherer Anteil an Mn und Si bei geringer Streckenenergie ab als bei hoher.

### 6.3.2 Zugprüfung

Die Quersugprüfung wurde an allen Proben, die in Tabelle 6.1-1 aufgeführt sind, durchgeführt. Nach ISO 15614-1 sind für Verfahrensproben je Prüfstück zwei Zugproben aus einem vorgeschriebenen Nahtbereich zu entnehmen. Für jede untersuchte Blechdicke wurde zur Ermittlung der Festigkeitseigenschaften des Grundwerkstoffes eine Zugprobe angefertigt. Zur Qualifizierung des Verfahrens muss die Zugfestigkeit der Schweißnaht mindestens der des Grundwerkstoffes entsprechen. Nach EN 10025-2 sind das  $470 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  für den verwendeten Grundwerkstoff S355J2+N.

Zur Vorbereitung der Quersugprüfung erfolgte das Heraustrennen der Proben aus dem Prüfstück mittels Wasserabrasivstrahlschneiden. Dieses Trennverfahren

ren besitzt den Vorteil, dass die Proben thermisch nicht beeinflusst werden und ein Nacharbeiten der Schnittflächen durch die hohe Genauigkeit und Qualität nicht erforderlich ist. Das von ISO 4136 geforderte Entfernen aller Nahtüberhöhungen durch eine spanende Bearbeitung wird durch die minimale Nahtüberhöhung und den damit kaum größeren Querschnitt gegenüber dem Grundmaterial als nicht erforderlich angesehen.

In Abbildung 6.3.2-1 ist exemplarisch eine zerstörte Probe einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik dargestellt, die mit einer Streckenenergie von  $18,8 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$  (Lage und Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) geschweißt wurde. Aus Abbildung 6.3.2-1 ersichtlich, ist die Bruchfläche im Grundwerkstoff. Die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes liegt im Durchschnitt bei  $572 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ .



Abbildung 6.3.2-1: Zerstörte Zugprobe einer Schweißung (Lage/Gegenlage-Technik),  $E = 18,8 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$

Blech: S355J2+N,  $t = 20 \text{ mm}$  DY-Naht,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 6 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 Lage:  $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Um die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes zu ermitteln, wurden aus dem reinen Schweißgut Rundzugproben (siehe Abbildung 6.3.2-2) herausgearbeitet. Dieses Schweißgut wurde mit einer Streckenenergie von  $23 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$  ( $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ ,  $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) mit der  $4,0 \text{ mm}$  Elektrode erzeugt und erreicht eine Streckgrenze von etwa  $500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  sowie eine Zugfestigkeit von  $640 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Im Diagramm der Abbildung 6.3.2-3 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugversuche dargestellt. Die Zugfestigkeit des Schweißgutes ist damit höher als die des Grundwerkstoffes.

In Abbildung 6.3.2-4 ist eine zerstörte Probe zu sehen, bei der ein Anriss von

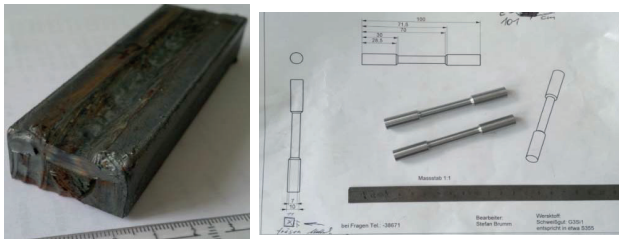


Abbildung 6.3.2-2: Reines Schweißgut für den Zugversuch (links) und gedrehte Zugproben (rechts)

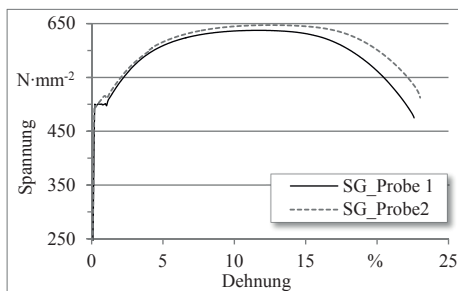


Abbildung 6.3.2-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des reinen Schweißgutes



Abbildung 6.3.2-4: Bruch im Grundwerkstoff bei Zugprobe mit Kerbe

einer Kerbe ausgeht (vgl. Abbildung 6.2.1-2 rechts). Trotz dieser Nahtunregelmäßigkeit erfolgte das Versagen im Grundwerkstoff.

Unabhängig von der Streckenenergie wird mit dem MSG-Dickdraht-Schweißen und der eingesetzten 4,0 mm G3Si1 Elektrode ein Schweißgut erzeugt, welches eine höhere Zugfestigkeit aufweist als die des Grundwerkstoffes. Aus den Untersuchungen kann gefolgert werden, dass sehr gute Festigkeitseigenschaften einer MSG-Dickdraht-Schweißung erreicht werden.

### 6.3.3 Kerbschlagbiegeprüfung

Die erzielten Festigkeiten der Schweißverbindung lassen keine Aussage über die Zähigkeit zu. Um die Einflüsse der Streckenenergie auf die Zähigkeit herauszustellen, wurde an verschiedenen Proben Kerbschlagbiegeprüfungen durchgeführt. Die Mindestkerbschlagzähigkeit des eingesetzten Grundwerkstoffes S355J2+N liegt bei 27 J bei einer Prüftemperatur von -20 °C. Zur Bestimmung der Zähigkeit der Schweißverbindungen wurden mindestens je drei Proben aus der Schweißnahtmitte und aus dem Bereich der WEZ entnommen. In Abbildung 6.3.3-1 sind Proben- und Kerblage (KL) zu sehen. Das rechte obere Bild zeigt die KL in der Nahtmitte und das untere die KL in der WEZ. Bei der KL in der WEZ wurde eine Hälfte des Kerbes in das Schweißgut und die andere Hälfte in den Grundwerkstoff gelegt.

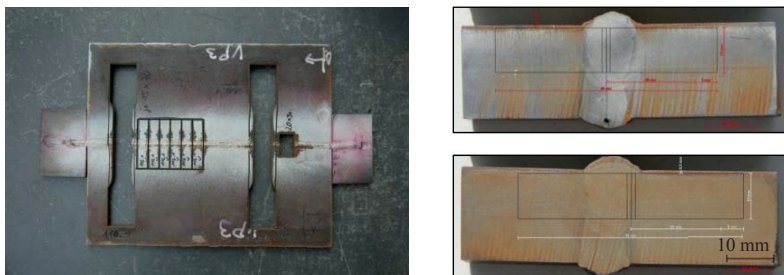


Abbildung 6.3.3-1: Wasserabrasivstrahlgeschnittene Verfahrensprobe mit entnommenen Zug-, Schliff- und Kerbschlagbiegeproben; links: Lage der Kerbschlagbiegeproben, rechts: Kerblage

Abbildung 6.3.3-2 stellt die Mittelwerte der Kerbschlagarbeit mit Streuung dar. Im ersten Balken des Diagramms sind die Werte des Grundwerkstoffes eingetragen. Die weiteren Balken im Diagramm setzen sich aus Schweißungen zusammen, die mit unterschiedlicher Streckenenergie geschweißt wurden. Die einzelnen Balken beinhalten für 23,0; 14,1 und 9,4 kJ·cm<sup>-1</sup> jeweils drei Proben (vgl. Abbildung 6.3.3-1 rechts).

Alle Zähigkeitswerte der Nahtmitte und der WEZ liegen über denen des Grundwerkstoffes. Beim Vergleich der Zähigkeitswerte der Schweißgüter wird deutlich, dass mit steigender Streckenenergie die Zähigkeit abnimmt. Auf den Abbrand der Legierungselemente Si und Mn ist die Zähigkeitsabnahme nicht zurückzuführen. Für eine gute Zähigkeit ist ein Mn/Si-Verhältnis von 2:1 bis 3:1 vorteilhaft [ANI95]. Dieses Verhältnis ist bei den untersuchten Proben durch die chemische Analyse nachgewiesen (siehe Kapitel 6.3.1). Eine Ursache

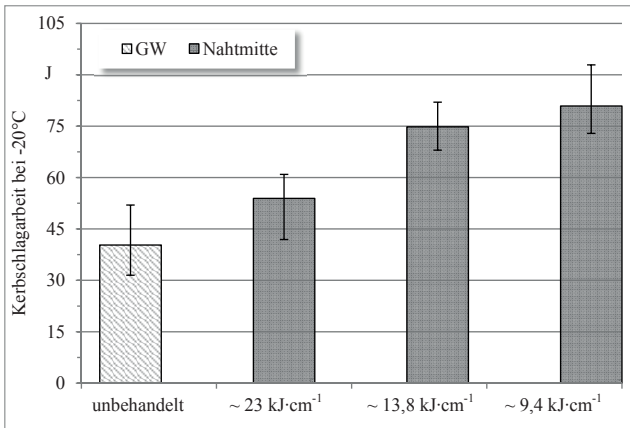


Abbildung 6.3.3-2: Kerbschlagzähigkeit von Grundwerkstoff und Schweißgut, Variation der Streckenenergie

für die Senkung der Zähigkeit kann die rechtwinklig zur Schmelzlinie verlaufende Erstarrung des Schweißgutes sein. Bei hohen Streckenenergien und tiefen Einbränden verläuft die Erstarrung dann in Richtung Schweißnahtmitte. Dabei werden niedrigschmelzende Phasen wie MnS vor der Erstarrungsfront in die Schweißnahtmitte geschoben, die anschließend erstarren. Dadurch ist der Schwefel-Gehalt in der Nahtmitte erhöht, was zur Folge hat, dass die Zähigkeit abnimmt. Im Querschliff der Abbildung 6.3.3-3 ist dies als heller Strich zu erkennen. Bei geringeren Streckenenergien erfolgt die Erstarrung in Richtung Nahtoberfläche, sodass der Einfluss der zähigkeitssenkenden Legierungselemente in der Nahtmitte reduziert ist.

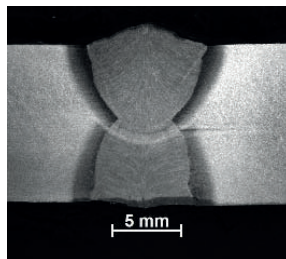


Abbildung 6.3.3-3: Querschliff einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik,  $E = 9,2 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$   
 Blech: S355J2+N,  $t = 12 \text{ mm}$  DY-Naht,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $b = 4 \text{ mm}$ ;  
 Drahtelektrode  $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$ ;  
 Lage/Gegenlage:  $I_{\text{Einstell}} = 640 \text{ A}$ ,  $v_d = 1,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $v_s = 120 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$

### 6.3.4 Härte nach Vickers

Zur Bestimmung der Härte wurden an ausgewählten Schweißproben Härteprüfungen nach Vickers durchgeführt. Die Auswahl erfolgte anhand unterschiedlicher Streckenenergien. Es wurden Proben mit Streckenenergie von 9,4; 13,8 und 23  $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  geprüft. Zur Erfüllung der Verfahrensprüfung ist nach ISO 15614-1 für den verwendeten Werkstoff S355J2+N eine maximale Härte von 380 HV10 nicht zu überschreiten.

Der Verlauf der Härtewerte über die Bereiche GW, WEZ und SG ist in Abbildung 6.3.4-1 für die Schweißung mit  $E = 9,4 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  dargestellt. Die Messreihen wurden zum einen 2 mm unterhalb der Blechkante und zum anderen im Bereich der Nahtüberschneidung angefertigt. Begonnen wurde dabei etwa 4 mm vor der Schmelzlinie im Grundwerkstoff. Wie aus dem Diagramm der Abbildung 6.3.4-1 zu entnehmen, entstehen Härtespitzen an der Schmelzlinie im Bereich der WEZ. Der maximale Härtewert liegt bei 326 HV10. Weiterhin ist zu erkennen, dass das Schweißgut im Mittel eine etwas höhere Härte (238 HV10) aufweist als der Grundwerkstoff (173 HV10). Unabhängig von der Ebene der Härtemessung (Lage, Mitte, Gegenlage) ist die Härte in etwa auf gleichem Niveau.

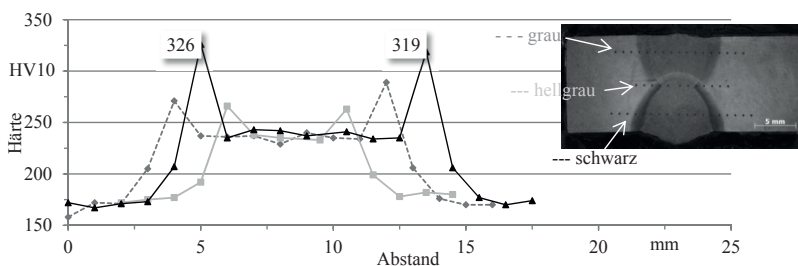


Abbildung 6.3.4-1: Härte einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik;  $E = 9,4 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$

Die Abbildung 6.3.4-2 zeigt den Härteverlauf einer Schweißung mit  $E = 20 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Lage) und  $E = 23 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Gegenlage). Die maximale Härte dieser Probe liegt bei 283 HV10 und damit tiefer als bei der Schweißung mit geringerer Streckenenergie. Der Grund dafür ist die höhere Wärmeeinbringung. Diese führt zu geringeren Abkühlgeschwindigkeiten, was eine niedrigere Aufhärtung in der WEZ zur Folge hat.

Bei der Betrachtung der Mittelwerte im Schweißgut fällt auf, dass bei der Lage (grauer Graph) das Niveau geringfügig höher (max. 20 HV10) liegt als bei der Gegenlage (schwarzer Graph) und der Nahtmitte (hellgrauer Graph). Die Schweißparameter waren bis auf die Schweißgeschwindigkeit (Lage:

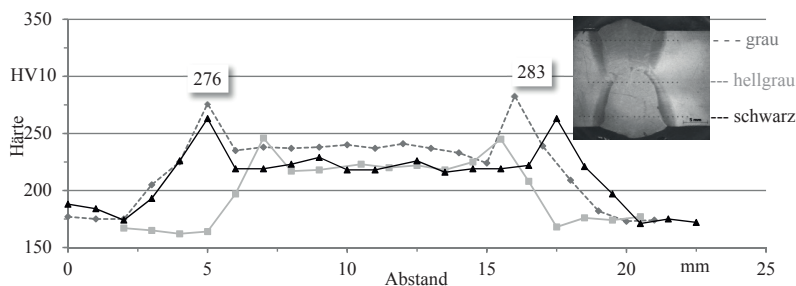


Abbildung 6.3.4-2: Härte einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik;  $E = 23 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$

$v_s = 90 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ , Gegenlage:  $v_s = 80 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) gleich eingestellt. Dadurch ist die Wärmeeinbringung bei der Gegenlage höher, was die Härtewerte senkt.

Die zulässigen Höchstwerte wurden bei keiner Schweißung überschritten. Bei den Verläufen der Härtewerte zeigt sich die typische U-Form mit einem steilen Anstieg in der WEZ und den Maximalwerten an der Schmelzlinie sowie mit einem höheren Härteniveau im Schweißgut als im Grundwerkstoff. Durch den Vergleich der Härteverläufe wird deutlich, dass mit der höchsten Streckenenergie die maximale Aufhärtung im Bereich der Schmelzlinie am geringsten ist. Der Unterschied lässt sich zudem daran erkennen, dass bei der Schweißprobe ( $E = 9,4 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) die Differenz zwischen maximaler Härte und dem Niveau der durchschnittlichen Härte im Schweißgut rund 80 HV10 beträgt während sie mit 40 HV10 bei der Schweißprobe ( $E = 23 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) lediglich halb so groß ist.

Im Vergleich zum UP-Schweißen sind die Abkühlgeschwindigkeiten des Schweißgutes wesentlich größer. D. h., die Gefahr unzulässiger Aufhärtungen der WEZ ist erhöht. Die Ergebnisse zeigen aber, dass für das MSG-Dickdraht-Schweißen bei Fügen von S355J2+N die Härte letztendlich in einem tolerierbaren Bereich liegt.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Herstellung geschweißter Konstruktionen ergeben sich heute aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte hohe Anforderungen an die Quantität, ohne dass dabei die Qualität vernachlässigt werden kann. Das Schweißverfahren bestimmt nicht nur die Mikrostruktur des erstarrten Gefüges und somit die mechanisch-technologischen Verbindungseigenschaften, sondern auch die Wirtschaftlichkeit. Bisher werden beim MSG-Schweißen Drahtelektroden mit Durchmessern bis zu 2,4 mm eingesetzt.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie sich die Vergrößerung des Drahtelektroden Durchmessers auf den MSG-Prozess in seiner Gesamtheit auswirkt. Dafür wurde der Stand der Technik der Hochleistungslichtbogen-schweißverfahren beleuchtet. Die experimentellen Versuche erfolgten mit einer vollelektronischen, sekundär getakteten Hochleistungs-Stromquelle und teilten sich in zwei Schwerpunkte. Zum einen zur Schaffung von Grundlagen zur Lichtbogensausbildung sowie zum Prozessverständnis und zum anderen zur Qualifizierung des MSG-Dickdraht-Verfahrens. Dabei stand die Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Schweißnaht im Mittelpunkt. Überprüft wurden mögliche technologische Vorteile.

Für die Untersuchung kamen Massivdrahtelektroden (G3Si1) mit unterschiedlichen Durchmessern ( $d_d = 3,2$  und  $4,0$  mm) zum Einsatz. Zur Prozess- und Lichtbogenanalyse wurde auf einem rohrförmigen Probekörper aus niedrig legiertem Stahl sowohl mit CV- als auch CC-Charakteristik geschweißt. Messtechnisch erfasst wurden Stromstärke und Spannung. Synchronisierte Hochgeschwindigkeitsaufnahmen dienten der Betrachtung und Beurteilung von Tropfenentstehung, -ablösung und Lichtbogensausbildung sowie Schmelzbaddynamik.

Für die Ermittlung der Schweißverbindungseigenschaften wurden Bleche mit den Dicken von 12, 15 und 20 mm geschweißt. Durch Versuche konnte die optimale Schutzgaszumischung von 30 % Ar Rest  $\text{CO}_2$  in Bezug auf die Spritzerbildung und das innere sowie äußere Nahtaussehen ermittelt werden. Höhere Anteile an Ar waren nicht zielführend.

Die umfassende Prozess- und Lichtbogenanalyse zeigte, dass beim MSG-Schweißen mit „dicken“ Drahtelektroden die klassische schweißleistungsabhängige Einteilung der Lichtbogenarten, wie vom MSG-Schweißen mit Drahtdurchmessern  $< 2,4$  mm bekannt, in Kurz-, Übergangs- und Sprühlichtbogen

nicht möglich ist. Ein sehr kurzer Lichtbogen, der unterhalb der Blechoberfläche brennt, erwies sich in allen untersuchten Leistungsbereichen als vorteilhaft, da die Spritzerhäufigkeit mit Steigerung der Lichtbogenlänge zunimmt. Aufgrund der hohen Regelgeschwindigkeit der Schweißmaschine ist ein Schweißen mit solch kurzen Lichtbögen möglich. Bei langen Lichtbögen, die aus der Blechoberfläche heraustreten, wird das Schweißgut aus dem Bereich der Fügezone verdrängt und es kommt zum „Schneid-Effekt“. Das Lichtbogenplasma ist dominiert von Metaldampf. Dadurch hat die Schutzgaszusammensetzung keinen wesentlichen Einfluss auf die innere Schweißnahtgeometrie.

Vergleichende Schweißversuche zeigten, dass bei Verwendung der CC-Kennlinie sowohl der Prozess stabiler abläuft als auch die Spritzerbildung geringer ist als bei Nutzung der CV-Kennlinie. Bei jeder Tropfenablösung ändert sich die Lichtbogenlänge, die durch die Regelung der Schweißmaschine ausgeglichen wird. Eine  $\Delta U$ -Regelung verursacht eine Spannungsänderung, die sich auf eine spritzerarme Tropfenablösung positiv auswirkt. Hingegen verursacht die  $\Delta I$ -Regelung bei einer Lichtbogenlängenänderung Stromschwankungen von bis zu 400 A, was dazu führt, dass die Tropfen unter Entstehung vieler Spritzer regelrecht weggesprengt werden. Für die Schweißverbindungen wurde deshalb mit der CC-Kennlinie gearbeitet. Beim UP-Schweißen wird die Schweißmaschinen-Kennlinie nach dem Drahtdurchmesser gewählt. Eine solche Auswahl kann beim MSG-Dickdraht-Schweißen nicht erfolgen.

Die vom UP-Schweißen bekannte Faustformel der Strombelastbarkeit der Drahtelektrode von 200 multipliziert mit dem Drahtdurchmesser (Ergebnis in Ampere) kann für das MSG-Dickdraht-Schweißen angewendet werden. Es ist ein stabiler Prozess mit akzeptabler Schweißnahtqualität beim MSG-Schweißen mit einem Drahtelektroden Durchmesser von 3,2 mm und einer Stromstärke von 640 A möglich. Abschmelzleistungen von über  $8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  sind ohne Weiteres erreichbar.

Durch Änderung der Streckenenergie infolge der Erhöhung der Stromstärke ist die Einschweißtiefe beeinflussbar. Ein weiterer Einflussfaktor auf die innere Schweißnahtgeometrie ist die Schweißgeschwindigkeit. Eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit führt aufgrund der Senkung der Streckenenergie zur Reduzierung der Einschweißtiefe. Mit dem verwendeten Versuchsaufbau konnte eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 120 cm/min prozesssicher realisiert werden. Die obere und untere Grenze für die Schweißgeschwindigkeit ist abhängig von der Schweißleistung.

Im Vergleich mit dem UP-Schweißen ist in Bezug auf die Nahtausbildung festzuhalten, dass die Oberflächenschuppung und Formung des Nahtäußeren beim UP-Schweißen wesentlich besser ausfällt. Eine Einstellung der Nahtbreite über die Lichtbogenspannung, wie es beim UP-Schweißen möglich ist, kann bei MSG-Dickdraht-Schweißen aufgrund der sehr kurz einzustellenden Lichtbögen

nicht erreicht werden. Die Nahtbreite ist nur geringfügig über die Schweißgeschwindigkeit einstellbar. Es muss erwähnt werden, dass das MSG-Dickdraht-Schweißen im Gegensatz zum UP-Schweißen ein sehr sensibler Prozess ist, bei dem kleinste Prozessinstabilitäten zu Poren und -nestern im Schweißgut führen können.

Um die Qualität der Schweißverbindung zu bestimmen, wurden verschiedene zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren eingesetzt. Die Sichtprüfungen sowie die Farbeindringprüfungen ergaben, dass die Schweißnähte hinsichtlich der Oberfläche in Bezug auf Einbrandkerben, Oberflächenporen und Risse bis auf wenige Ausnahmen eine hohe Qualität aufwiesen. Bei der Durchstrahlungsprüfung wurde festgestellt, dass aufgrund einer diskontinuierlichen Drahtförderung und Schweißbewegungen Poren im Nahtinneren entstanden. Porenfreie Schweißnähte können aber bei exakter Drahtförderung und kontinuierlicher Schweißgeschwindigkeit prozesssicher erzeugt werden. Härtespitzen im Bereich der Wärmeeinflusszone an der Schmelzlinie erreichen Maximalwerte von 326 HV10. Darüber hinaus erwies sich die Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes als weitaus besser als die des Grundwerkstoffes. Die Zugproben versagten bis auf eine Ausnahme im Grundwerkstoff. Ursache hierfür war ein Porennest am Nahtende, welches durch die oben genannte Prozessinstabilität entstand.

Bei Einhaltung aller prozessbedingten Besonderheiten und unter Beachtung der verfahrensspezifischen Randbedingungen können mit dem MSG-Dickdraht-Verfahren anforderungsgerechte Schweißnähte hergestellt werden. Die Untersuchungen ergaben, dass die Lage/Gegenlage-Technik empfehlenswert ist. Schweißungen an 20 mm Blechen konnten mit einer Lage pro Seite und Schweißgeschwindigkeiten von bis zu  $90 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  prozesssicher ausgeführt werden.

Mit den Untersuchungen wurden Grundlagen geschaffen, die den Einsatz des MSG-Dickdraht-Schweißens für weitere Werkstoffe ermöglichen. Da die Werkstoffpalette in den Industriezweigen, in denen dickwandige Bauteile verarbeitet werden, vielfältig ist, sind anwendungsbezogene Voruntersuchungen des Verfahrens an Werkstoffen wie beispielsweise Feinkornbaustählen empfehlenswert. Zur Senkung der Schmelzbaddynamik sind Verfahrensvarianten zu untersuchen, die die Prozessenergie senken. Von den Verfahrensvarianten des UP-Schweißens sind dafür das Kaltdraht- und Heißdraht-Schweißen geeignet. Darüber hinaus können zur Reduzierung der Schweißbadbewegung schlackenbildende Fülldrähte verarbeitet werden.

Mit der Erweiterung der MSG-Verfahrensvarianten um das MSG-Dickdraht-Schweißen ist eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Abschmelzleistung möglich. Damit ergeben sich wesentliche Vorteile für den Anwender im Dickblechbereich ( $s > 8 \text{ mm}$ ). Zur Nutzung der Potentiale des

neuen Verfahrens müssen im Hinblick auf die Übertragung der Laborergebnisse in die industrielle Fertigung, Versuche unter Praxisbedingungen durchgeführt werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- [AIC75] Aichele G., Smith A. A.: MAG-Schweißen; Fachbuchreihe „Schweißtechnik“ Band 65, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf: 1975
- [AIC14] Aichele G.: Elliraschweißen war einmal der Knüller – Ein Blick in die Geschichte des Unterpulverschweißens; Schweißen und Schneiden 66, Heft 12, S. 738-743, DVS-Media, Düsseldorf: 2014
- [AIC15] Aichele G.: Geschichte der Schweißtechnik; Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 159, DVS-Media, Düsseldorf: 2015
- [ALI05] Alimov A., Rosert R., Rybak A.: UP-Schweißen von Großrohren mit Fülldraht und Schmelzschweißpulvern, DVS-Berichte Band 237, S. 545-548, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2005
- [AND68] Anders W.: Einfluß der Schweißverfahren und der Schweißbedingungen auf die Wärmeeinbringung beim Schweißen; Schweißtechnik 18, Heft 7, S. 326-328, ZIS Mitteilungen, Halle: 1968
- [ANI95] Anik S., Dorn L.: Schweißneigung metallischer Werkstoffe; DVS-Verlag, Düsseldorf: 1995
- [ANN74] Annecke A.; Hartung F.: Energetische und technologische Grundlagen der Schutzgas-(CO<sub>2</sub>)-Schweißung, Dissertation, Magdeburg 1974
- [APP02] Appel L., Serve M., Baum L., Cramer H.: Hochwertiges und wirtschaftliches Beschichten durch MSG-Tandemschweißen; Schweißen und Schneiden 54, Heft 7, S. 370-377, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2002
- [ARE08] Aretov I.: Einfluss der Kaltdrahtzufuhr beim Unterpulverschweißen von hochwarmfesten Nickelbasislegierungen; Dissertation, Shaker Verlag, Aachen: 2008
- [ARN93] Arnold P., Hereth M.: Der T.I.M.E.-Prozeß in der täglichen Praxis; Technica Band 42 Heft 11, S. 64, 1993
- [BAA82] Baach H., Scholz E., Weyland F.: Praktische Erfahrungen beim Unterpulverschweißen mit mikrolegierten Fülldrahtelektroden; DVS-Berichte Band 74, S. 117-124, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1982
- [BAC98] Bachmann H., Aichele G.: Hochleistungs-MAG-Schweißen; Der Praktiker, Band 50, Heft 5, S. 147-150, 152-153, DVS-Verlag, Düs-

- seldorf: 1998
- [BAU90] Baum L., Fichter V.: Der Schutzgasschweißer. Teil 2. MIG-/MAG-Schweißen, Die Schweißtechnische Praxis Band 12, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1990
- [BAU97] Baum L., Knoch R.: Höhere Wirtschaftlichkeit durch MAG-Hochleistungs-schweißverfahren; 25. Sondertagung Schweißen im Anlagen- und Behälterbau, DVS-Berichte Band 183 S. 50-55, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1997
- [BEC03] Beckert M.: Aus der Geschichte des Schweißens: Von der Erfindung des Unterpulverschweißens, Schweißen und Schneiden Band 55 Heft 4, S. 200-202, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2003
- [BOR95] Borner A.: Beitrag zur Verarbeitung thermomechanisch gewalzter Grobbleche mit modernen Hochleistungsschweißverfahren; Dissertation, Aachen: 1995
- [BUD06] Budig B.: „ForceArc“ – ein kraftvolles Werkzeug zum MIG-/MAG-Schweißen; Jahrbuch der Schweißtechnik 2006, S. 66-70, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2005
- [BUR79] Burczyk J.: Automatisches Unterpulver-Schweißen mit Elektrodenvorwärmung aus einer zusätzlichen Stromquelle, Technik 34. Jg., Heft 12, S. 683-685, 1979
- [BUR93] Burget W.: Einfluß schweißtechnischer Fertigungsbedingungen auf das Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten von UP-Mehrlagenschweißgut. Teil 1, Oerlikon Schweißmitteilungen Band 51, Heft 129, S. 4-10, Eisenberg: 1993
- [BUR96] Burget W.: Einfluß schweißtechnischer Fertigungsbedingungen auf das Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten von UP-Mehrlagenschweißgut, Oerlikon Schweißmitteilungen, Heft 131, S. 19-23, Eisenberg: 1996
- [CAL93] Caloun K.: Über die Wärmeeinbringung und deren Einfluß auf die Nahtausbildung und Gefüge bei niederfrequent gepulsten UP-Schweißungen, Dissertation, Wien: 1993
- [CLA52] Clapp E.A., Schreiner N.G.: Characteristic of Submerged Arc Welding with Three-Phase Power, Welding Journal, Jg. 31, Heft 6, S. 479-485, 1952
- [CON59] Conn W. M.: Die Technische Physik der Lichtbogenschweißung einschliesslich der Schweißmittel; Springer-Verlag, Berlin: 1959
- [DIL70] Diltney U., Eichhorn F.: Röntgen-Hochgeschwindigkeitsfotografische Untersuchungen der Kavernebewegung, der Tropfenentstehung und des Tropfenüberganges beim Unterpulverschweißen mit austenitischen Cr-Ni-

- Stahlbandelektroden; Schweißen in der Kerntechnik, S. 59-63, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1970
- [DIL71] Dilthey U., Eichhorn F.: Röntgen-Hochgeschwindigkeitsphotographie von Lichtbogenbewegung und Werkstoffübergang beim Unterpulverschweißen, VDI-Zeitung 113 Nr. 1, S. 33-38, VDI-Verlag, Düsseldorf: 1971
- [DIL80] Dilthey U.: Unterpulverschweißen im Dünnblechbereich – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen; Industrieanzeiger 102, Heft 28, S. 43-46, Konradin-Verlag, Leinfelden-Echterdingen: 1980
- [DIL04] Dilthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2, Springer-Verlag, Berlin: 2004
- [DIL06] Dilthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 - Schweiß- und Schneidtechnologien, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 2006
- [DIR04] Dirksen D., Ohms D., Kühn H., Rennecke D.: Schweißen im Windturbau; DVS-Berichte Band 232, S. 63-67, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2004
- [DIR05] Dirksen D.: Nicht alltägliche Anwendungen des Unterpulverschweißverfahrens; DVS-Berichte Band 235, S. 35-38, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2005
- [DIR06] Dirksen D., Paschold R.: Varianten des Unterpulverschweißens – Möglichkeiten der Steigerung der Abschmelzleistung und der Wirtschaftlichkeit, DVS-Berichte Band 240, S. 28-31, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2006
- [DOR85] Dorn L., Rippl P.: Prozeßanalyse beim Unterpulverschweißen – Lichtbogenstabilität und Momentanwertverlauf der elektrischen Größen bei Änderung der Verfahrensparameter, Schweißen und Schneiden, Band 37, Heft 2, S. 68-73, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1985
- [DOR85.1] Dorn L., Rippl P.: Prozeßanalyse beim Unterpulverschweißen mit transitorisierter Stromquelle, Schweißen und Schneiden, Band 37, Heft 3, S. 114-119, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1985
- [DOR86] Dorn L., Rippl P.: Stromquelleneinfluss beim Lichtbogenschweißen – statisches Verhalten; Schweißen und Schneiden, Heft 6, S. 267-271, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1986
- [DUC66] Duchno W.M., Franz U., Wittke K.: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Abschmelzleistung beim UP-Schweißen; Schweißtechnik 16, Heft 11, Halle: 1966
- [DVS909-1] DVS Merkblatt 909: Grundlagen des MAG-Hochleistungsschweißen mit Massivdrahtelektroden; DVS-Verlag, Düsseldorf: September 2000

- 
- [DVS915] DVS Merkblatt 915: Unterpulver-Mehrdrachtschweißen, DVS-Verlag, Düsseldorf: Februar 2000
- [EGE12] Egerland S., Stauffer H.: Erweiterung des quantitativen und qualitativen Prozessspektrums beim MSG-Tandem-Schweißen unter Anwendung der neuen Verfahrensvariante CMT-Twin; DVS-Berichte Band 286, S. 334-344, DVS Media, Düsseldorf: 2012
- [EIC72] Eichhorn F., Engel A.: Kavernenbewegung und Tropfenübergang beim Unterpulverschweißen, VDI-Zeitung 114 Nr. 2, S. 151-154, VDI-Verlag, Düsseldorf: 1972
- [EIC75] Eichhorn F.: Untersuchung der physikalischen Eigenschaften von Schweißpulvern und ihr Einfluss auf den Ablauf des Schweißprozesses, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Kenn-Nr. 2688, Aachen: 1975
- [EIC76] Eichhorn F., Felleisen R., Huwer W.: Werkstoffübergang und Lichtbogenverhalten bei der Unterpulver-Draht- und Bandschweißung, DVS-Berichte Band 42, S. 55-70, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1976
- [EIC77] Eichhorn F., Felleisen R.: Einfluss der physikalischen Eigenschaften von Schweißpulvern auf den Ablauf des Unterpulverschweißens; Schweißen und Schneiden Heft 5, S. 173-176, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1977
- [EIC78] Eichhorn F., Felleisen R., Kerkmann M.: Einfluß der Energieeinbringung auf den Verfahrensablauf beim Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode, DVS-Berichte Band 50, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1978
- [EIC83] Eichhorn F.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Band 1: Schweiß- und Schneidtechnologien, VDI-Verlag, Düsseldorf: 1983
- [ENG72] Engel A.: Beitrag zur Prozessanalyse beim Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode, Dissertation Aachen: 1972
- [ENG73] Engel A., Eichhorn F.: Beitrag zur Prozessanalyse beim Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode, Schweißen und Schneiden, Heft 2, S. 64-65, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1973
- [ENG93] Engindeniz E.: Unterpulver-Hochleistungsschweißen mit Fülldrahtelektroden; DVS-Berichte Band 155, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1993
- [ENG94] Engindeniz E.: Unterpulver-Hochleistungsschweißen mit Fülldrahtelektroden; Oerlikon Schweißmitteilungen Heft 130, S. 11-20, Eisenberg: 1994
- [ENG00] Engindeniz E., Osivandi K.B.: Unterpulverschweißen mit Fülldrahtelektroden - Technologie, Wirtschaftlichkeit, Anwendungs-



- beispiele; Jahrbuch der Schweißtechnik 2000, S. 167-178, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1999
- [ENG05] Engindeniz E., Berg B., Linden W.: Großrohrfertigung für Sauergasleitungen aus schweißtechnischer Sicht; DVS-Berichte Band 237, S. 539-544, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2005
- [ERN66] Ernenputsch H., Hummitzsch W., Becker P.: Schweißen unter Kohlendioxid mit Massivdrähten größeren Durchmessers; DVS-Berichte 46; DVS Verlag: 1966
- [EWM09] N.N.: EWM HIGHTEC WELDING GmbH: EWM-SCHWEISSLEXIKON. 09.12.2014, <http://www.ewm-group.com/de/praxiswissen/schweisstechnisches-wissen.html>
- [FEL78] Felleisen R.: Einfluss des zeitlichen Energieverlaufs und der Stromrichtung auf den Prozessablauf beim UP-Schweißen mit Drahtelektrode, Dissertation, Aachen: 1978
- [FRA65] Franz U.: Vorgänge in der Kaverne beim UP-Schweißen, Dissertation, Magdeburg: 1965
- [FRA66] Franz U.: Vorgänge in der Kaverne beim UP-Schweißen, Teil 2: Einfluß der Schweißdaten und des Zusatzwerkstoffs auf die Werkstoffübertragung und den Charakter des Werkstoffübergangs beim UP-Schweißen; Schweißtechnik 16, Heft 9, S. 400-404, Berlin: 1966
- [FRA68] Franz U., Hanke H.: Beitrag zur Leistungssteigerung beim UP-Schweißen; Schweißtechnik 18, Heft 8, S. 341-344, Halle: 1968
- [FRA69] Franz U.: Werkstoffübergang beim UP-Paralleldrahtschweißen, Schweißtechnik 19, Heft 4, S. 149-153, Berlin: 1969
- [FRU94] Fuhrländer G., Liebenow D., Hofmann C.: UP-Schweißen des voll-austenitischen warmfesten Stahls X 3 CrNiMoN 17 13, Oerlikon Schweißmitteilungen Band 52, Heft 130, S. 4-10, Eisenberg: 1994
- [GEH99] Gehring M., Paschold R.: Fülldrahtelektroden für das Unterpulverschweißen. Eine Möglichkeit zur Optimierung des Schweißprozesses; Jahrbuch der Schweißtechnik 2000, S. 120-127, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1999
- [GRA05] Gräb T.: Optimierung des Mehrlageschweißens mit der UP-Dünndraht-Tandemtechnik, Dissertation, Band1/2005, Verlag Shaker, Aachen: 2005
- [GRO94] Grobecker J: Beitrag zum Unterpulverschweißen mit thyristorisierten Wechselstromquelle; Dissertation, Band 5/94, Verlag Shaker, Aachen: 1994

- [HAD04] Hadamik P., Heuser H.: Praxis des Unterpulverschweißens – Teil 4: Kalkulationsgrößen, praktische Hinweise und Schweißparameter, Technica, Band 53 Heft 15/16, S. 48-51 Ruppertswil: 2004
- [HÄL14] Hälsig A.: Energetische Bilanzierung von Schutzgasschweißverfahren; Dissertation, Universitätsverlag Chemnitz: 2014
- [HEI67] Heinke H., et al.: Einseitiges UP-Paralleldrahtschweißen , Schweißtechnik Jg. 17, Heft 7, S. 475-481, Berlin: 1967
- [HEN13] Henkel K.-M., Peters R., Gericke A., Sumpf A.: Wirtschaftliches UP-Quer-Schweißen an größeren Blechdicken in der Offshore-Struktur- und Schiffskörperendmontage, DVS-Berichte Band 296, S. 229-234 DVS-Media, Düsseldorf: 2013
- [HER89] Hereth M.; Schlatter B.: Erhöhung von Leistung und Qualität beim UP-Verfahren durch den Einsatz von zwei Drähten im Doppeldrahtprinzip; OERLIKON Schweißmitteilungen, Heft 121, S. 4-11, Zürich: 1989
- [HER07] Herold H., Zinke M., Hübner A., Boese E., Göllner J., Schilling K.: Zusammenhänge zwischen Aufmischung und Eigenschaften überlegierter Schweißnähte am Superduplexstahl, 13. Sommerkurs Werkstoffe und Fügen; S. 139-154, Magdeburg: 2007
- [JÄS14] Jäschke B.: Von klassischer MSG-Prozessregelung zur modernen Schweißstromquellenregelung mit „Dynamik“-Verstellung, Schweißen und Schneiden 66, Heft 10, S. 600-605, DVS-Media, Düsseldorf: 2014
- [JEN76] Jentzsch W., Jochim M.: Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen der Schweißgeschwindigkeitssteigerung für das Schutzgas-(CO<sub>2</sub>)-Schweißverfahren, Dissertation, Dresden: 1976
- [JÖB00] Jöbst H., Aichele G.: Höhere Wirtschaftlichkeit durch MAG-Tandemschweißen; Der Praktiker, Schweißen und Schneiden Heft 6, S. 218-220, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2000
- [JÜT99] Jüttner S.: Untersuchungen zum Schutzgasschweißen von Magnesiumlegierungen für Konstruktionsbauteile im Automobilbau; Dissertation, Braunschweig: 1999
- [KER78] Eichhorn F., Felleisen R., Kerkmann M.: Einfluß der Energieeinbringung auf den Verfahrensablauf beim Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode, DVS-Berichte Band 50, S. 158-164, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1978
- [KIL78] Killing R., Thier H.: Einige Leistungs- und Verbrauchswerte für das Unterpulverschweißen, Der Praktiker Heft 1, S. 9-12; DVS-Verlag, Düsseldorf: 1978
- [KIL82] Killing R., Böhme D., Helwig R.: Betrag zur Frage der günstigen Stromart und Energieeinbringung beim Unterpulvertan-

- demschweißen, Schweißen und Schneiden 34, Heft 10, S. 475-482, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1982
- [KIL83] Killing R., Böhme D., Helwig R: Beitrag zur Kristallisation der Raupen beim Unterpulvertandemschweißen, Schweißen und Schneiden 35, Heft 4, S. 169-173, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1983
- [KIL93] Killing R.: Handbuch der Schweißverfahren, Teil I: Lichtbogenschweißverfahren, 2. Auflage, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1991
- [KIL93.1] Killing R.: Schutzgase zum Lichtbogenschweißen – richtig verwenden; Metallverarbeitung: Fachzeitschrift für das Handwerk in den östlichen Bundesländern, Band 47, Heft 3, S. 28-30, Coleman, Lübeck: 1993
- [KLO13] Kloshek A., Jüngling R., Krink V., Michailov V.: Unterpulverschweißen in Zwangspositionen mit neuem Pulvertransportsystem; DVS-Berichte Band 296, S. 50-55, DVS Media, Düsseldorf: 2013
- [KNI54] Knight D.E.: Multiple Electrode welding by „Unionweld” Process, Welding Journal, Band 33, Heft 4, S. 303-312, American Welding Society, New York: 1954
- [KNO96] Knoch R.: MAG-Doppeldrahtschweißen; Jahrbuch der Schweißtechnik 1996, S. 119-125, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1995
- [KUB56] Kubli R.A., Shrubsall H.I.: Multipower Submerged Arc Welding of Pressure Vessels and Pipes, Welding Journal, Band 35, Heft 11, S. 1128-1135, American Welding Society, New York: 1956
- [KUP91] Kupetz B.: Patentschrift DD 295 115 A5 – Pulverhaltevorrichtung beim einseitigen Unterpulverschweißen horizontaler Nähte an aufrechtstehenden Metallplatten, Deutsches Patentamt: 1991
- [LAN86] Langenbahn H. W.: Steuerung eines definierten Werkstoffübergangs beim MIG/MAG-Schutzgasschweißen mit Stromimpulsen; Dissertation, RWTH Aachen: 1986
- [LAN03] Lang A.: MIG-Wechselstromschweißen – eine neue Verfahrensvariante zum Verbinden dünnwandiger Bauteile; DVS Berichte Band 225, DVS Verlag, Düsseldorf: 2003
- [LES58.1] Lesnewich A.: Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal arc welding: Part I – Control of electrode melting rate; Welding Journal, Band 37, Heft 8, S. 343- 353, American Welding Society, New York: 1958
- [LES58.2] Lesnewich A.: Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal arc welding: Part II – Control of metal transfer; Welding Journal, Band 37, Heft 9, S. 418- 425, American Welding Society, New York: 1958

- 
- [LIN01] Werbefrospekt, Lincoln Electric Europe, POWER WAVE® 1000 AC/DC
- [LUK01] Lukkari J.: Look at the deposition rates in SAW now!, Svetsaren, English Edition Band 56 Heft 2/3, S. 51-57, Helsinki: 2001
- [MAG91] Mages K., Nies, H.: Unterpulverschweißen mit variablem Wechselstrom; DVS-Berichte Band 136, S. 40-45, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1991
- [MAN56] Mantel W.: Überlegungen über die Bedeutung der physikalischen Vorgänge im Schweißlichtbogen, Schweißen und Schneiden, Jg. 8, Heft 8, S. 80-287, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1956
- [MAT91] Matzner H. R.: Qualitätssicherung beim spritzerarmen MAGM-Impulslichtbogenschweißen durch Regelung der Prozessgrößen; Schweißtechnische Forschungsberichte, Band 40 DVS Verlag, Düsseldorf: 1991
- [MAT02] Matthes K.-J.: Vorträge des 5. Chemnitzer Symposiums Fügetechnik, Schweißtechnik; Chemnitz: 2002
- [MAT02.1] Matthes K.-J., Richter E. (Hrsg.): Schweißtechnik - Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Fachbuchverlag Carl Hanser, Leipzig: 2002
- [MAT08] Matthes K.-J., Richter E.: Schweißtechnik - Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Fachbuchverlag Carl Hanser, Leipzig: 2008
- [MOO13] Moos W., Janßen-Timmen R., Loenenko N., Klöpfer J.: Gesamtwirtschaftliche und sektorale Wertschöpfung aus der Produktion und Anwendung von Fügetechnik in Deutschland; Endbericht, DVS Verlag, Düsseldorf: 2013
- [MÜL83] Müller P., Wolff L.: Handbuch des Unterpulverschweißens, Teil I: Verfahren – Einstellpraxis – Geräte – Wirtschaftlichkeit; DVS-Verlag, Düsseldorf: 1983
- [NIE95] Nies H., Keville B., Schlatter B.: Beitrag zur Technologie des Unterpulver-Mehrdrahtschweißens, DVS-Berichte Band 170, S. 77-83, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1995
- [NN83] N.N.: Patentschrift DD 257 166 A3 - Vorrichtung für das automatische Überkopf-Unterpulverschweißen; Amt für Erfindungs- und Patentwesen. 1983
- [NN04] N.N.: Fügetechnik Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2004
- [NN08.1] N.N.: Patentschrift DE 10 2008 056 281 A1 - Vorrichtung und Verfahren zum Unterpulverschweißen mit Lichtbogen, Deutsches Patent- und Markenamt: 2008

- [NN08.2] N.N.: Fertigung bemerkenswerter Bauwerke mit großer Wanddicke; DVS-Berichte Band 250, S. 43-47, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2008
- [NN14] N.N.: Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MSG-Schweißprozesse durch konsequente Nutzung der Potentiale von Schutzgasen; IGF-Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben IGF-Nr. 17.431 BR, 2014
- [NN16.1] N.N.: Leipziger Zentralstadion, URL: <http://www.leipzig-sachsen.de/leipzig-fotos/images/leipzig-wm-stadion-oben.jpg>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.2] N.N.: Viadukt von Millau, URL: <http://broer.no/bro/index.php?ID=11>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.3] N.N.: Bau einer Pipeline, URL: <http://images.dailyhive.com/20160926093057/pipeline.jpg>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.4] N.N.: Liebherr Mobilkran LTM 11200-9.1, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/produkte/mobil-und-raupenkrane/mobilkrane/ltm-mobilkrane/details/ltm1120091.html#lightbox>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.5] N.N.: Bau der „Celebrity Solstice“ in der Meyer Werft, URL: <https://aufsee.files.wordpress.com/2008/08/2008080501solstice.jpg>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.6] N.N.: Fertigung von FLIRT-Triebzügen bei Stadler, URL: <http://www.stadlerail.com/de/>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.7] N.N.: Druckbehälterfertigung, URL: <http://jhk.de/de/leistungen/stahl-und-behaelterbau.html>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.8] N.N.: Spannbandbrücke in Oberhausen, URL: <https://bauforumstahl.de/slinky-springs-to-fame-oberhausen>, verfügbar am 21.12.2016
- [NN16.9] N.N.: Offshore-Windanlagen im Aufbau, URL: [http://www.constructalia.com/english/news\\_and\\_articles/news/offshore\\_wind\\_farms\\_with\\_arcelormittal\\_quality\\_steels](http://www.constructalia.com/english/news_and_articles/news/offshore_wind_farms_with_arcelormittal_quality_steels), verfügbar am 21.12.2016
- [PAT58] Paton E.-O.: Automatische Lichtbogenschweißung, VEB Carl Marhold Verlag, Halle: 1958
- [PRO76] Probst R., Hartung F., Annecke A.: Leistungsbereiche und Leistungsgrenzen bei der Schutzgas-CO<sub>2</sub>-Schweißung, ZIS-Mitteilungen, Heft 2, S. 159-170, Halle: 1976

- [REI08] Reisgen U., Aretov I., Gräb T., Mußmann, J.: Industrielle Anwendung des UP-Kaltdrahtschweißens (von Rundnähten) an Bauteilen aus Alloy 617 mod. für Kraftwerke der neuen Generation, DVS-Berichte Band 250, S. 299-302, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2008
- [REI14] Reisgen U., Schäfer J., Willms K.: Prozesseinflüsse der Unterpulver-Impulstechnologie auf den Wasserstoffeintrag hochfester Feinkornbaustähle, DVS-Berichte Band 306, S. 262-267, DVS Media, Düsseldorf: 2014
- [REI15] Reisgen U., Schäfer J., Willms K.: Unterpulver-Impulsschweißverfahren zur Reduzierung des Wasserstoffeintrags beim Schweißen hochfester Feinkornbaustähle; Schweißen und Schneiden Band 67 Heft 1-2, S. 48-53, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2015
- [RIE67] Rieder W.: Plasma und Lichtbogen; F. Vieweg und Sohn GmbH Verlag, Braunschweig: 1967
- [ROß13] Roßmann F.: Mehr Kontrolle beim Tandemschweißen; Der Praktiker, Schweißen und Schneiden Heft 1-2, S. 14-19, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2013
- [RUC70] Ruckdeschel W.: Schutzgasschweißen – Der Werkstoffübergang beim MIG- und MAG-Schweißen, DVS Berichte Band 18, S. 15 - 27, DVS-Verlag, Düsseldorf: 1970
- [RUG93] Ruge J.: Handbuch der Schweißtechnik Bd. 2: Verfahren und Fertigung; Springer Verlag, Berlin: 1993
- [RYK57] Rykalin N.N.: Berechnung der Wärmevorgänge beim Schweißen; VEB Verlag Technik, Berlin: 1957
- [SCHA62] Schatz W.: Die Unterpulverschweißung, Theorie und Praxis; Oerlikon Elektrodenfabrik Eisenberg GmbH, Eisenberg: 1962
- [SCHE85] Schellhase M.: Der Schweißlichtbogen – ein technologisches Werkzeug; VEB Verlag Technik; Berlin: 1985
- [SCHM13] Schmidt K.-P.: Lichtbogen-Hochleistungsschweißen: Varianten und Modulationsarten bestimmen den Werkstoffübergang, die Wärmeeinbringung und de Lichtbogen; Schweißen und Schneiden 65, Heft 9, S. 636-644, DVS-Media, Düsseldorf: 2013
- [SCHM70] Schmidt V.: Beiträge zur Kenntnis der Vorgänge beim Unter - Pulver - Schweißen, Dissertation, Clausthal: 1970
- [SCHO84] Scholz E., Weyland F.: Derzeitiger Stand des UP-Schweissens mit mikrolegierten Fuelldrahtelektroden; Oerlikon-Schweissmitteilungen Band 42 Heft 106, S. 4-14, Eisenberg: 1984
- [SCHO10] Schofer E., Houdayer G.: Neue Entwicklungen beim UP-Tandem-Engspalt-Schweißen, Sondertagung Schweißen im Anla-

- gen- und Behälterbau 38, DVS-Berichte Band 262, S. 34-39, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2010
- [SCHU14] Schumacher P., Raudsepp H.: Der revolutionäre Unterpulverschweißprozess ICETM – Ein neuentwickelter, patentierter Schweißprozess mit integrierter Kaltdrahtzufuhr; DVS-Berichte Band 286, S. 323-328, DVS Media, Düsseldorf: 2012
- [SCHU97] Schuster J.: Schweißen von Eisen-, Stahl- und Nickelwerkstoffen; DVS-Verlag, Düsseldorf: 1997
- [TAN42] Tannheim H.: Die physikalisch-chemischen Grundlagen des Ellira-Verfahrens; Elektroschweißung 13.Jahrg. Heft 2; S. 17-24, Braunschweig: 1942
- [THI84] Thier H., Killing R.: Metallurgische Besonderheiten beim UP-Mehrdrahtschweißen im Vergleich zum Eindrahtschweißen, Oerlikon-Schweissmitteilungen, Band 42, Heft 105, S. 32-39, Eisenberg: 1984
- [THU08] Thurner S.: Erzeugung und Anwendung modulierter Prozessgasströme beim Schutzgasschweißen, Dissertation, Chemnitz: 2008
- [TRO02] Trommer G.: Schweißen mit zwei Drahtelektroden; Der Praktiker, Schweißen und Schneiden Heft 1, S. 20-23, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2000
- [TUS99] Tušek J.: UP-Mehrdraht-Verbindungs- und Auftragschweißen, Schweiss- und Prüftechnik, Band 53, Heft 4, S. 55-58, Wien: 1999
- [TUS02] Tusek J., Suban M.: High-productivity multi-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition, Journal of Materials Processing Technology 133, S. 207-213, Elsevier, Ljubljana: 2002
- [TYB57] Tybus G.: Farbige Zeitlupenaufnahmen zur Beobachtung des Schweißbades beim UP-Schweißen; Schweißtechnik, Heft 3, S. 68-71, Halle: 1957
- [VDH11] von der Hagen J., Korkhaus J.: Chemieapparate aus hochlegierten Stählen - Schweißnähte als Angriffspunkt der Korrosion; DVS-Berichte Band 274, S. 30-36, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2011
- [WEH89] Wehrhahn D.: Beitrag zur Kornfeinung von Gefüge beim Unterpulver-Schweißen; Universität Hannover, Dissertation, Hannover: 1989
- [WEL89] Welz W., Knoch R.: Untersuchung des Metall-Aktivgasschweißens mit Impulslichtbogen; Schweißen und Schneiden, Band 41, Heft 10, S.542-546, DVS Verlag, Düsseldorf: 1989

- [WIL06] Wilhelm G.: Quantitative Optimierung des Energieeintrags beim MSG-Hochleistungsschweißen nichtrostender Stähle, Dissertation, Technische Universität Chemnitz: 2006
- [WIM03] Wimmer G.: Fertigung eines gewickelten Wärmetauschers aus Aluminium; DVS-Berichte Band 223, S. 83-88, DVS-Verlag, Düsseldorf: 2003



## 9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ausgewählte Produktionsergebnisse zu Geräten zum Schweißen, Löten und thermischen Trennen in Deutschland, Stand 2011 [MOO13] .....	1
Abbildung 1-2:	Ausgewählte Produktionsergebnisse zu Zusatzwerkstoffen zum Schweißen und Löten in Deutschland, Stand 2011 [MOO13] .....	2
Abbildung 1-3:	a) Leipziger Zentralstadion [NN16.1]; b) Viadukt von Millau [NN16.2]; c) Bau einer Pipeline [NN16.3]; d) Liebherr Mobilkran LTM 11200-9.1 [NN16.4]; e) Bau der „Celebrity Solstice“ in der Meyer Werft [NN16.5]; f) Fertigung von FLIRT-Triebzügen bei Stadler [NN16.6]; g) Druckbehälterfertigung [NN16.7]; h) Spannbandbrücke in Oberhausen [NN16.8]; i) Offshore-Windanlagen im Aufbau [NN16.9] .....	3
Abbildung 2.1.1-1:	Einordnung des Schutzgas- und Unterpulverschweißens in die Gruppe der Schmelzschweißverfahren .....	5
Abbildung 2.1.2-1:	Verfahrensprinzip des MSG-Schweißens [MAT12] .....	6
Abbildung 2.1.2-2:	Aufbau eines Transformators mit primär-/sekundärseitigem Stufenschalter [MAT02] .....	7
Abbildung 2.1.2-3:	Schaltschema und Wirkungsweise der $\Delta I$ -Regelung [GRO94] .....	8
Abbildung 2.1.2-4:	Schematische Darstellung eines primär getakteten Schweißumrichter [RUG93] .....	8
Abbildung 2.1.2-5:	Verfahrensprinzip des Unterpulverschweißens .....	9
Abbildung 2.1.2-6:	Varianten zum UP-Zwangslagenschweißen, links: Formgleitstück; rechts: Formscheibe .....	10
Abbildung 2.1.2-7:	Schaltschema und Wirkungsweise der $\Delta U$ -Regelung [GRO94] .....	11

Abbildung 2.1.2-8:	Aufbau eines Transformators mit Streukern [MAT02] .	12
Abbildung 2.1.2-9:	Aufbau eines Transduktors [MAT02].....	12
Abbildung 2.1.2-10:	Blockdiagramm einer Thyristor-Schweißstromquelle [MAT02] .....	12
Abbildung 2.1.2-11:	Einstellmöglichkeiten einer modernen UP-AC-Stromquelle Variation von: Stromstärke, positive Stromstärke, negative Stromstärke, Frequenz, Nulldurchgang $dI/dt$ , Zeit [LIN01] .....	13
Abbildung 2.1.3-1:	Lichtbogenarten beim MSG-Prozess [DVS0909-1] .....	14
Abbildung 2.1.3-2:	$U/I$ -Verlauf beim Kurzlichtbogen-Schweißen von AlMg5; $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $I_s = 103 \text{ A}$ , $U_s = 11,7 \text{ V}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , AlMg4,5; Schutzgas: I1 .....	15
Abbildung 2.1.3-3:	$U/I$ -Verlauf beim EWM-coldArc® .....	15
Abbildung 2.1.3-4:	$U/I$ -Verlauf und Tropfenablösung einer DC-Impulsschweißung; $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $P = 3850 \text{ W}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , G 22 9 3 NL; Schutzgas: I1 .....	17
Abbildung 2.1.3-5:	$U/I$ -Verlauf und Tropfenablösung einer AC-Impulsschweißung; $v_d = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $P = 4130 \text{ W}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , G22 9 3 NL; Schutzgas: I1 .....	17
Abbildung 2.1.3-6:	Einteilung und Bezeichnung der Prozessvarianten des MSG-Hochleistungsschweißens [DVS0909-1] .....	18
Abbildung 2.1.3-7:	Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung [RUG93].....	20
Abbildung 2.1.3-8:	Günstige (rechts) und ungünstige (links) Raupengeometrie beim UP-Schweißen [HER89].....	20
Abbildung 2.1.3-9:	Versuchsanordnung zur Messung der Temperatur im Schweißdraht [ENG72] .....	21
Abbildung 2.1.3-10:	Axiale Temperaturverteilung im Schweißdraht bei unterschiedlichen Kontaktrahabständen [ENG72] $I_s = 550 \text{ A}$ , $U_s = 30 \text{ V}$ , $v_s = 50 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	22
Abbildung 2.1.3-11:	Schweißnahtgeometrie; Einfluss der Strombalance (links) und der Zeitbalance (rechts) [LIN01].....	22
Abbildung 2.1.3-12:	Abschmelzleistung in Abhängigkeit von Stromstärke und -art beim UP-Schweißen von Massiv- und Fülldrähten mit gleichem Durchmesser [ENG94] .....	24
Abbildung 2.1.3-13	Schematische Darstellung des UP-Kalt- (links) und Heißdrahtschweißens (rechts) [MAT08].....	24

Abbildung 2.1.3-14:	UP-Doppeldraht-Schweißen, links: Diagonalanordnung, rechts: Hintereinander [NN04] .....	25
Abbildung 2.1.3-15:	Abschmelzleistung von niedrig legierten Drähten beim UP-Doppeldrahtschweißen [HER89] .....	26
Abbildung 2.1.3-16:	Mögliche Anordnungen beim UP- Paralleldrahtschweißen [TUS99, TUS02] .....	26
Abbildung 2.1.3-17:	Prinzipskizze des ICE <sup>TM</sup> -Prozess [SCH14] .....	27
Abbildung 2.1.3-18:	UP-Mehrdrahtschweißen; links: UP-Tandemschweißen, rechts: UP-Mehrdrahtschweißen mit 6 Elektroden [MAT08, REI08] .....	27
Abbildung 2.1.3-19:	Blaswirkung infolge der elektromagnetischen Felder [REI08] .....	28
Abbildung 2.2-1:	Lichtbogenformen [MAN56] .....	30
Abbildung 2.2-2:	Kräfte im Lichtbogenraum beim MSG-Schweißen [RUC70] .....	32
Abbildung 2.2-3:	Kraftwirkung auf den Lichtbogen infolge des Magnetfeldes bei unterschiedlichen Schutzgasen [DIL06] .....	33
Abbildung 2.2-4:	Klassifikation des Werkstoffüberganges [SCHE85] .....	34
Abbildung 2.2-5:	Anordnung der Stromzuführung in der Versuchsplatte beim UP-Schweißen zur Ermittlung der Blaswirkung [FRA65] .....	36
Abbildung 2.2-6:	Viskosität verschiedener Schweißpulverschmelzen abhängig von der Temperatur [EIC77] .....	37
Abbildung 4.2-1:	Zusammenhang zwischen Schweißnaht, Lichtbogen, Drahtelektrode sowie Grundwerkstoff und deren Einflussfaktoren .....	43
Abbildung 4.2-2:	Quellengebiete am Lichtbogen mit zugehörigen Spannungsabfällen [SCH85] .....	44
Abbildung 4.2-3:	Schematische Darstellung einer Lichtbogenkennlinie bei konstanter Lichtbogenlänge und definiertem Lichtbogenmedium .....	45
Abbildung 4.3-1:	Physikalische - und technologische Einflussfaktoren beim MSG-Dickdraht-Schweißen .....	47
Abbildung 5.2-1:	Prinzip der virtuellen Maschine .....	50
Abbildung 5.2-2:	Versuchsstand zur Lichtbogenuntersuchung .....	51
Abbildung 5.3.2-1:	Werkstoffübergang mit Kurzschluss CC-Kennlinie; $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $I_{\text{Einstell}} = 515 \text{ A}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1 .....	56

Abbildung 5.3.2-2:	Werkstoffübergang mit kurzschlussartigem Spannungsabfall CV-Kennlinie; $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 56
Abbildung 5.3.2-3:	Werkstoffübergang ohne Kurzschluss CC-Kennlinie; $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $I_{\text{Einstell}} = 730 \text{ A}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 57
Abbildung 5.3.2-4:	Werkstoffübergang mit Änderung der Strahlungsintensität des Licht- bogens ohne Kurzschluss CV-Kennlinie; $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 57
Abbildung 5.3.2-5:	Schema zum Ausgehen des Lichtbogens ..... 58
Abbildung 5.3.2-6:	Werkstoffübergang mit Änderung der Strahlungsintensität des Lichtbogens und Kurzschluss CV-Kennlinie; $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 59
Abbildung 5.3.2-7:	Schematische Darstellung der Spannungsmessung am Lichtbogen ..... 59
Abbildung 5.3.2-8:	Untersuchtes Parameterfenster bei der CV-Kennlinie Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 61
Abbildung 5.3.2-9:	Lichtbögen bei unterschiedlicher Spannung; CV-Kennlinie $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 62
Abbildung 5.3.2-10:	Schematische Darstellung des Schweißens mit niedriger und hoher Lichtbogenspannung..... 62
Abbildung 5.3.2-11:	$U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 63
Abbildung 5.3.2-12:	$U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 40 \text{ V}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 63
Abbildung 5.3.2-13:	$U/I$ -Verlauf und Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 ..... 64
Abbildung 5.3.2-14:	$U/I$ -Verlauf und Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie und Begrenzung des Stromes

	(500 A < I < 700 A) $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $U_{\text{Einstell}} = 36 \text{ V}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	66
Abbildung 5.3.2-15:	U/I-Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie ohne Begrenzung des Stromes $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $U_{\text{Einstell}} = 36 \text{ V}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	66
Abbildung 5.3.2-16:	Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	67
Abbildung 5.3.2-17:	Bereiche der Lichtbögen im U/I-Diagramm der CV- Kennlinie.....	68
Abbildung 5.3.2-18:	Langer Lichtbogen mit „Schneid-Effekt“ .....	68
Abbildung 5.3.2-19:	Untersuchtes Parameterfenster bei der CC-Kennlinie ..	70
Abbildung 5.3.2-20:	Einzelbild der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CC-Kennlinie, $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	70
Abbildung 5.3.2-21:	U/I-Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie; $I_{\text{Einstell}} = 650 \text{ A}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	71
Abbildung 5.3.2-22:	Einzelbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen mit CC-Kennlinie, $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	72
Abbildung 5.3.2-23:	U/I-Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie; $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	72
Abbildung 5.3.2-24:	U/I-Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie; $I_{\text{Einstell}} = 670 \text{ A}$ $v_d = 2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1; Schutzgas C1.....	73
Abbildung 5.3.2-25:	Bereiche der Lichtbögen im untersuchten Parameterfenster der CC-Kennlinie .....	73
Abbildung 5.3.3-1:	Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogen- ausbildung beim Schweißen mit CV- Kennlinie Oben und rechts: Einzelbilder des Lichtbogens, Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung.....	76
Abbildung 5.3.3-2:	U/I-Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ , Schutzgas M21 $v_d = 3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode Ø 3,2 mm, G3Si1.....	77

Abbildung 5.3.3-3:	Rotationslichtbogen beim Schweißen mit CV-Kennlinie und Schutzgas I1 .....	77
Abbildung 5.3.3-4:	Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Lichtbogensausbildung beim Schweißen mit CC-Kennlinie Oben und rechts: Einzelbilder des Lichtbogens Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung .....	78
Abbildung 5.3.3-5:	Kurzer Lichtbogen beim Schweißen mit CC-Kennlinie und Schutzgas M21 .....	78
Abbildung 5.3.4-1:	Distanz zwischen Kontaktdüse und Werkstück (Brennerabstand).....	79
Abbildung 5.3.4-2:	Einfluss des Brennerabstandes auf die Lichtbogensausbildung beim Schweißen mit CV-Kennlinie Oben: Einzelbilder des Lichtbogens, Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung .....	80
Abbildung 5.3.4-3:	$U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ; Brennerabstand 10 mm $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;	
Abbildung 5.3.4-4:	Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 .....	80
Abbildung 5.3.4-5:	Lichtbogensausbildung bei einem Stick-out von 10 mm (links) und 70 mm (rechts).....	81
Abbildung 5.3.4-6:	Zusammenhang zwischen Widerstand im freien Drahtende und Stick-out .....	82
Abbildung 5.3.4-7:	Einfluss des Brennerabstandes auf die Lichtbogensausbildung beim Schweißen mit CC-Kennlinie Oben: Einzelbilder des Lichtbogens, Unten: Gemessene Stromstärke und Spannung .....	83
Abbildung 5.3.5-1:	$U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CV-Kennlinie; $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ .....	84
Abbildung 5.3.5-2:	$U/I$ -Verlauf beim Schweißen mit CC-Kennlinie; $I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$ .....	84
Abbildung 5.3.5-3:	Leistungsvergleich zwischen CV- ( $U_{\text{Einstell}} = 38 \text{ V}$ ) und CC-Kennlinie ( $I_{\text{Einstell}} = 810 \text{ A}$ ) $v_d = 3,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 3,2 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas C1 .....	85
Abbildung 5.4.2-1:	Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Nahtausbildung, $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	87
Abbildung 5.4.2-2:	Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Nahtausbildung, $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	87

Abbildung 5.4.3-1:	Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung, Drahtdurchmesser 3,2 mm .....	88
Abbildung 5.4.3-2:	Einfluss der Stromstärke auf die Nahtausbildung, Drahtdurchmesser 4,0 mm .....	88
Abbildung 5.4.4-1:	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf den Einbrand bei verschiedenen Stromstärken, Drahtdurchmesser 4,0 mm .....	90
Abbildung 5.4.5-1:	Einfluss des Stick-outs bei Schweißungen mit CV- Kennlinie, $U_{\text{Einstell}} = 32 \text{ V}$ , $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; links: Brennerabstand 30 mm, rechts: Brennerabstand 50 mm.....	91
Abbildung 5.4.5-2:	Einfluss der Brennerneigung auf den Einbrand .....	92
Abbildung 5.4.6-1:	Abschmelzleistung in Abhängigkeit der Stromstärke ....	93
Abbildung 5.5.2-1:	Nahtgeometrie einer einseitig ausgeführten Schweißnaht.....	94
Abbildung 5.5.2-2:	Einseitig ausgeführte Schweißnähte; links: ohne, rechts: mit Durchschweißung Blech: S355J2+N, $t = 12 \text{ mm}$ , $a = 30^\circ$ , $b = 5 \text{ mm}$ ; $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ links: $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , rechts: $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	95
Abbildung 5.5.2-3:	Einseitig ausgeführte Schweißnaht mit ungenügender Durchschweißung Blech: S355J2+N, $t = 15 \text{ mm}$ , $a = 60^\circ$ , $b = 7 \text{ mm}$ ; $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ .....	96
Abbildung 5.5.2-4:	Einseitig in zwei Lagen ausgeführte Schweißnaht Blech: S355J2+N, $t = 12 \text{ mm}$ , $a = 60^\circ$ , $b = 3 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; Decklage: $I_{\text{Einstell}} = 750 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , Wurzel: $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $v_s = 70 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	96
Abbildung 5.5.2-5:	Nahtgeometrie einer zweiseitig ausgeführten Schweißnaht.....	97

Abbildung 5.5.2-6:	Zweiseitig ausgeführte Schweißnaht Blech: S355J2+N, $t = 12 \text{ mm}$ $a = 60^\circ$ , $b = 4 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ Lage und Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ..... 98
Abbildung 5.5.3-1:	Lichtbogenansatz bezogen auf das Blech in Abhängigkeit der Nahtvorbereitung..... 99
Abbildung 5.5.3-2:	Einseitig ausgeführte Schweißnähte mit verschiedenen Einbränden abhängig vom Nahtöffnungswinkel $a$ links: $30^\circ$ und $v_s = 90 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ , rechts: $60^\circ$ und $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ Blech: S355J2+N, $t = 20 \text{ mm}$ , $a = 60^\circ$ , $b = 10 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ..... 100
Abbildung 5.5.4-1:	Einseitig ausgeführte Schweißnähte mit verschiedenen Einbränden abhängig von der Fugentiefe $c$ Blech: S355J2+N, $a = 30^\circ$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ links: $t = 15 \text{ mm}$ , $b = 6 \text{ mm}$ ; rechts: $t = 20 \text{ mm}$ , $b = 10 \text{ mm}$ ..... 101
Abbildung 6.2.1-1:	Schweißnaht mit Decklageunterwölbung (links) und nicht aufgeschmolzener Nahtflanke (rechts) Blech: S355J2+N, $t = 20 \text{ mm}$ DY-Naht, $a = 60^\circ$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; rechts: $b = 6 \text{ mm}$ Lage: $I_{\text{Einstell}} = 760 \text{ A}$ , $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 90 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 760 \text{ A}$ , $v_d = 1,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; links: $b = 8 \text{ mm}$ ; Lage: $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 130 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 880 \text{ A}$ , $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 120 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ..... 104



Abbildung 6.2.1-2:	Schweißnaht für die Sichtprüfung Blech: S355J2+N, $t = 15 \text{ mm}$ $a = 60^\circ$ , $b = 5 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; Lage und Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	105
Abbildung 6.2.3-1:	Vorwärmung einer Schweißnaht (links) und Überprüfung der Vorwärmtemperatur (rechts) .....	106
Abbildung 6.2.3-2:	Röntgenfilm einer Schweißung (Lage/Gegenlage- Technik) Blech: S355J2+N, $t = 15 \text{ mm}$ $a = 60^\circ$ , $b = 5 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; Lage und Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 620 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	107
Abbildung 6.3.2-1:	Zerstörte Zugprobe einer Schweißung (Lage/Gegenlage-Technik), $E = 18,8 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ Blech: S355J2+N, $t = 20 \text{ mm}$ DY-Naht, $a = 60^\circ$ , $b = 6 \text{ mm}$ ; Drahtelektrode $\varnothing 4,0 \text{ mm}$ , G3Si1; Schutzgas 30 % Ar Rest $\text{CO}_2$ ; Lage: $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 630 \text{ A}$ , $v_d = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $v_s = 60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	109
Abbildung 6.3.2-2:	Reines Schweißgut für den Zugversuch (links) und gedrehte Zugproben (rechts) .....	110
Abbildung 6.3.2-3:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm des reinen Schweißgutes .....	110
Abbildung 6.3.2-4:	Bruch im Grundwerkstoff bei Zugprobe mit Kerbe ...	110
Abbildung 6.3.3-1:	Wasserabrasivstrahlgeschnittene Verfahrensprobe mit entnommenen Zug-, Schliff- und Kerbschlagbiegeproben; links: Lage der Kerbschlagbiegeproben, rechts: Kerblage .....	111
Abbildung 6.3.3-2:	Kerbschlagzähigkeit von Grundwerkstoff und Schweißgut, Variation der Streckenenergie .....	112
Abbildung 6.3.3-3:	Querschliff einer Schweißung in Lage/Gegenlage- Technik, $E = 9,2 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ Blech: S355J2+N, $t = 12 \text{ mm}$ DY-Naht, $a = 60^\circ$ , $b = 4 \text{ mm}$ ;	

---

	Drahtelektrode $\varnothing$ 4,0 mm, G3Si1;	
	Schutzgas 30 % Ar Rest CO <sub>2</sub> ;	
	Lage/Gegenlage: $I_{\text{Einstell}} = 640$ A, $v_d = 1,4$ m·min <sup>-1</sup> ;	
	$v_s = 120$ cm·min <sup>-1</sup> .....	112
Abbildung 6.3.4-1:	Härte einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik;	
	$E = 9,4$ kJ·cm <sup>-1</sup> .....	113
Abbildung 6.3.4-2:	Härte einer Schweißung in Lage/Gegenlage-Technik;	
	$E = 23$ kJ·cm <sup>-1</sup> .....	114

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.3.1-1:	Versuchsmatrix zur Lichtbogenuntersuchung .....	53
Tabelle 5.3.1-2:	Bestimmung der Lichtbogenart nach Tropfengröße .....	54
Tabelle 5.3.1-3:	Bestimmung der Lichtbogenart nach Auftreten von Kurzschlüssen beim Werkstoffübergang .....	55
Tabelle 5.3.2-1:	Einstellparameter zur Lichtbogenuntersuchung mit CV-Kennlinie .....	59
Tabelle 5.3.2-2:	Einstellparameter zur Lichtbogenuntersuchung mit CC-Kennlinie .....	69
Tabelle 5.4.1-1:	Versuchsmatrix zur Schweißnahtausbildung .....	86
Tabelle 5.5.1-1:	Versuchsmatrix zu den Schweißverbindungen .....	94
Tabelle 6.1-1:	Versuchsmatrix zu den Schweißverbindungen im Stumpfstoß .....	103
Tabelle 6.3.1-1:	Chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode G3Si1 und der mit verschiedenen Streckenenergien erzeugten Schweißgüter .....	108